

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV ELEKTROENERGETIKY**

**FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF ELECTRICAL POWER ENGINEERING**

**VYUŽITÍ NANOTECHNOLOGIÍ V JADERNÉ
ENERGETICE**

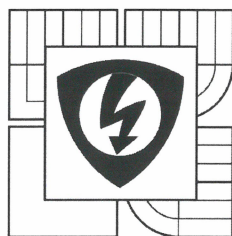
**NANOTECHNOLOGY UTILIZATION IN NUCLEAR INDUSTRY AND
RESEARCH**

**DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS**

**AUTOR PRÁCE
AUTHOR**

Bc. JIŘÍ SKALIČKA

BRNO 2013



VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

magisterský navazující studijní obor
Elektroenergetika

Student: Bc. Jiří Skalička

Ročník: 2

ID: 70330

Akademický rok: 2012/13

NÁZEV TÉMATU:

Využití nanotechnologií v jaderné energetice

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Nanotechnologie a jaderná energetika (Přehledně zpracujte odbornou rešerši k vývoji nanotechnologií, jednotlivým typům materiálů. Diskutujte jejich současné použití a jejich možné využití v jaderné energetice.)
2. Využití nanotechnologií v jaderné oblasti (Zpracujte odborné podklady pro navrhovaná, testovaná a projektovaná využití nanotechnologií v jaderné energetice. Zaměřte se na využití nanotechnologií v jaderném výzkumu, zejména jako prostředí pro rozptyl neutronů.)
3. Chování neutronů v nanovlákních (Popište interakce neutronů v nanovlákních a nanotrubičkách různých materiálů.)
4. Experimentální validace (Navrhněte validační experiment svých výpočtů a připravte žádost o reaktorový čas pro měření na školním jaderném reaktoru VR-1 na ČVUT v Praze.)

DOPORUČENÁ LITERATURA:

podle pokynů vedoucího práce

Termín zadání: 11.2.2013

Termín odevzdání: 24.5.2013

Vedoucí práce: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Konzultanti diplomové práce:



doc. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda oporové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor diplomové práce nesmí při vytváření diplomové práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Bibliografická citace práce:

SKALIČKA, J. *Využití nanotechnologií v jaderné energetice*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2013. 90 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Prohlášení:

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. Díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

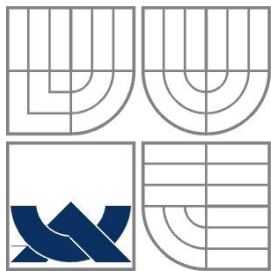
.....

Poděkování:

Na tomto místě bych rád poděkoval vedoucímu mé diplomové práce, Ing. Karlovi Katovskému, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady a podněty a za všechnen čas, který mi věnoval při vypracovávání této práce a při realizaci experimentální části.

Dále bych rád poděkoval zaměstnancům pracoviště reaktoru VR-1 za jejich čas, ochotu, úsilí a rady v průběhu realizace experimentů. Také děkuji panu Ing. Jaroslavu Pekárkovi, Aloisovi Langerovi a Bc. Lukáši Martincovi za pomoc při návrhu a výrobě experimentálního zařízení. Díky patří také firmě ON Semiconductor za bezplatné poskytnutí křemíkových waferů pro pořízení fotografií na mikroskopu atomárních sil a panu Ing. Pavlu Čudkovi za pomoc při přípravě vzorků a pořizování snímků na tomto mikroskopu.

V neposlední řadě bych chtěl poděkovat všem dalším lidem, kteří mi pomohli svými radami a podporou při vypracování a realizaci celé práce, hlavně Ing. Janu Varmužovi a Ing. Pavlu Procházkovi.



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ



Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav elektroenergetiky

Diplomová práce

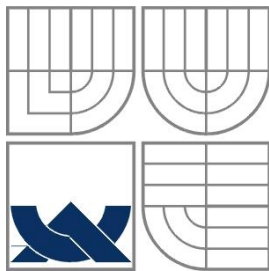
Využití nanotechnologií v jaderné energetice

Bc. Jiří Skalička

Vedoucí: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Ústav elektroenergetiky, FEKT VUT v Brně, 2013

Brno



BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Electrical Power Engineering

Master's Thesis

Nanotechnology utilization in nuclear industry and research

by

Bc. Jiří Skalička

Supervisor: Ing. Karel Katovský, Ph.D.

Brno University of Technology, 2013

Brno

ABSTRAKT

Práce shrnuje současné poznatky o nanomateriálech a jejich použití. Zabývá se hlavně metodami výroby a použitím jednotlivých typů materiálů v oblasti jaderné energetiky, jaderného výzkumu a jaderné medicíny. Teoretická část je věnována možnostem využití uhlíkových nanotrubek pro kolimaci nebo vedení svazku neutronů. V experimentální části bylo zjišťováno, jak vybrané nanomateriály ovlivňují neutronový tok v měřícím boxu napojeném na horizontální radiální kanál reaktoru VR-1. Otestovány byly neorientované uhlíkové nanotrubky, uhlíková nanovlákná, nanodráty z aluminy, orientované uhlíkové nanotrubky při různém natočení a výsledky byly porovnány s výsledky při použití grafitu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Nanomateriály; nanotrubky; nanovlákná; nanodráty; grafen; jaderná energetika; jaderný výzkum; kolimace neutronů; neutronovod; neutronová optika; výroba nanomateriálů

ABSTRACT

This thesis introduces reader to current knowledge of nanomaterials and their usage. It summarises production methods and usage of different materials in nuclear power plants, nuclear research and nuclear medicine. Theoretical part of this thesis is dedicated to possible usage of carbon nanotubes for neutron beam collimation and guides. In experimental part different materials were tested in measuring box connected to horizontal radial channel of VR-1 nuclear reactor and their influence on neutron flux was measured. Tested samples were non-oriented carbon nanotubes, carbon nanofibers, alumina nanowires, oriented carbon nanotubes with several angles of rotation and these samples were compared with results of graphite.

KEY WORDS

Nanomaterials; nanotubes; nanofibers; nanowires; graphene; nuclear power; nuclear research; neutron collimation; neutron guides; neutron optics; nanomaterials production

OBSAH

1 ÚVOD	16
2 ÚVOD DO NANOTECHNOLOGIÍ	17
2.1 DEFINICE A HISTORIE	17
2.2 STAVBA HMOTY NA ÚROVNI ATOMŮ	18
2.2.1 CHEMICKÉ VAZBY MEZI ATOMY	18
2.2.2 HYBRIDIZACE	19
2.3 KRYSTALOVÁ STRUKTURA HMOTY	19
2.4 TYPY NANOOBJEKTŮ	20
2.4.1 NANOČÁSTICE	21
2.4.2 NANOVLÁKNA	21
2.4.3 NANODESKY	21
3 METODY VÝROBY NANOMATERIÁLŮ	22
3.1 VÝROBA NANOČÁSTIC	22
3.1.1 SYNTÉZA V PLYNNÉ FÁZI (<i>GAS PHASE SYNTHESIS</i>)	22
3.1.2 SYNTÉZA SOL-GEL PROCESY (<i>SOL-GEL PROCESSING</i>)	23
3.1.3 PŘÍPRAVA TOP-DOWN METODAMI	23
3.1.4 VÝROBA NANOKRYSTALICKÝCH MATERIÁLŮ	24
3.2 VÝROBA NANOVLÁKEN	25
3.2.1 METODA ELEKTROZVLÁKŇOVÁNÍ (<i>ELECTROSPINNING</i>)	25
3.2.2 METODA VAPOUR-LIQUID-SOLID (VLS)	25
3.2.3 ELEKTROCHEMICKÉ METODY	26
3.2.4 METODA CHEMICKÉ DEPOZICE PAR (CVD)	26
3.3 VÝROBA NANODESEK	27
3.3.1 METODA FYZIKÁLNÍ DEPOZICE VRSTEV (PVD)	27
3.3.2 METODA CVD	28
3.3.3 VÝROBA SAMOORGANIZACÍ	28
3.4 VÝROBA NANOKOMPOZITNÍCH MATERIÁLŮ	29
3.4.1 NANOKOMPOZITY S KOVOVOU MATRICÍ	29
3.4.2 NANOKOMPOZITY S KERAMICKOU MATRICÍ	30
3.4.3 NANOKOMPOZITY S POLYMERNÍ MATRICÍ	30
3.4.4 VÝROBA NANOTEKUTIN	30
4 DRUHY NANOMATERIÁLŮ A JEJICH POUŽITÍ	31
4.1 UHLÍKOVÉ NANOMATERIÁLY	31
4.1.1 FULLERENY	31
4.1.2 NANOTRUBKY	32
4.2 NANOMATERIÁLY ANORGANICKÝCH SLOUČENIN	34
4.2.1 TiO_2 NANOMATERIÁLY	34
4.2.2 Al_2O_3 NANOMATERIÁLY	34
4.2.3 KOVOVÉ NANOMATERIÁLY	35
4.3 ZDRAVOTNÍ RIZIKA NANOMATERIÁLŮ	35

5 UHLÍKOVÉ NANOTRUBKY JAKO PRVEK NEUTRONOVÉ OPTIKY	37
5.1 SOUČASNÉ MOŽNOSTI NEUTRONOVÉ OPTIKY	37
5.1.1 PASIVNÍ KOLIMACE	37
5.1.2 REFRAKTIVNÍ A REFLEKTIVNÍ OPTIKA	37
5.1.3 DIFRAKTIVNÍ OPTIKA	39
5.2 OPTICKÁ VLÁKNA	39
5.3 POUŽITÍ CNT PRO VEDENÍ NEUTRONŮ	40
5.4 SIMULACE SYSTÉMŮ NEUTRONOVÉ OPTIKY	43
5.5 ZÁCHYTOVÁ NEUTRONOVÁ TERAPIE	43
6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH NANOMATERIÁLŮ	45
6.1 POUŽITÉ MATERIÁLY A VZORKY	45
6.1.1 NEORIENTO VANÉ MWCNT	45
6.1.2 UHLÍKOVÁ NANOVLÁKNA	46
6.1.3 NANODRÁTY Z Al_2O_3	46
6.1.4 ORIENTO VANÉ MWCNT	46
6.1.5 GRAFIT	47
6.1.6 OLOVO	47
6.1.7 DALŠÍ POUŽITÉ MATERIÁLY	47
6.2 MĚŘICÍ PŘÍSTROJE A ZAŘÍZENÍ	48
6.2.1 REAKTOR VR-1	48
6.2.2 DETEKTORY NEUTRONŮ S ^3He	49
6.2.3 TŘÍKANÁLOVÉ AMPLITUDOVÉ ANALYZÁTORY	50
6.2.4 MĚŘIČ DÁVKOVÉHO EKVIVALENTU NEUTRONŮ S BONNEROVOU SFÉROU	50
6.2.5 AKTIVAČNÍ DETEKTORY NEUTRONŮ	51
6.2.6 MĚŘICÍ BOX S SHUTTEREM	51
6.2.7 DRŽÁK VZORKŮ	52
6.2.8 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ	52
6.3 POUŽITÉ METODY MĚŘENÍ	53
6.3.1 PŘÍMÁ DETEKCE NEUTRONOVÉHO TOKU ^3He DETEKTORY	53
6.3.2 NEUTRONOVÁ AKTIVAČNÍ ANALÝZA	54
6.4 EXPERIMENT 1 – OVLIVNĚNÍ TOKU NEUTRONŮ RŮZNÝMI MATERIÁLY	56
6.4.1 NAMĚŘENÁ DATA	56
6.4.2 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU	58
6.5 EXPERIMENT 2 – OVLIVNĚNÍ TOKU NEUTRONŮ ORIENTO VANÝMI UHLÍKOVÝMI NANOTRUBKAMI	59
6.5.1 NAMĚŘENÁ DATA	59
6.5.2 ZHODNOCENÍ EXPERIMENTU	60
6.6 EXPERIMENT 3 – NEPŘÍMÁ DETEKCE POMOCÍ AKTIVAČNÍCH DETEKTORŮ	61
6.6.1 NAMĚŘENÁ A VYPOČTENÁ DATA	62
7 ZÁVĚR	65
POUŽITÁ LITERATURA	67
PŘÍLOHA A: SCHÉMA HORIZONTÁLNÍHO RADIÁLNÍHO KANÁLU	71
PŘÍLOHA B: SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ	72

PŘÍLOHA C: SCHÉMA PŘIPOJENÍ MĚŘÍCÍHO BOXU K HRK.....	73
PŘÍLOHA D: NAMĚŘENÁ A VYPOČTENÁ DATA Z AKTIVAČNÍ ANALÝZY	74
PŘÍLOHA E: KOREKČNÍ Činitele PRO HPGE DETEKTOR	80
PŘÍLOHA F: GAMA SPEKTRUM AKTIVAČNÍHO DETEKTORU „JJ“	81
PŘÍLOHA G: SNÍMEK NEORIENTOVANÝCH CNT Z MIKROSKOPU AFM	82
PŘÍLOHA H: FOTODOKUMENTACE PRŮBĚHU MĚŘENÍ	84

SEZNAM OBRÁZKŮ

<i>Obr. 2-1: Možné tvary orbitalu p [24]</i>	18
<i>Obr. 2-2: Druhy kubických mřížek - zleva prostá, prostorově středěná, plošně středěná [26]</i>	20
<i>Obr. 2-3: Základní typy nanoobjektů - a) nanočástice, b) nanovláknko, c) nanodeska [14]</i>	20
<i>Obr. 2-4: Příklad grafenového listu [11]</i>	21
<i>Obr. 3-1: Výroba kovového nanoprášku metodou syntézy v plynné fázi [10]</i>	22
<i>Obr. 3-2: Příklad metody IGC [28]</i>	23
<i>Obr. 3-3: Příklad metody HPT [34]</i>	24
<i>Obr. 3-4: Průběh zvlákňování metodou electrospinningu [23]</i>	25
<i>Obr. 3-5: Schéma metody CVD [19]</i>	26
<i>Obr. 3-6: Kapkový model metody CVD [19]</i>	27
<i>Obr. 3-7: Základnový model metody CVD [19]</i>	27
<i>Obr. 3-8: Metoda PVD využívající elektronový svazek [35]</i>	28
<i>Obr. 3-9: Pokrývání povrchu destičky LB filmem [37]</i>	29
<i>Obr. 4-1: Fulleren C₆₀ [39]</i>	31
<i>Obr. 4-2: Ukázka a) SWCNT a b) MWCNT [1]</i>	32
<i>Obr. 4-3: Vítězné grafické návrhy značky nano-hazard z World Social Forum v Nairobi</i>	36
<i>Obr. 5-1: Fokuse neutronů pomocí difrakce na krystalu</i>	39
<i>Obr. 5-2: Optické vlákno a jeho parametry</i>	40
<i>Obr. 5-3: Vedení neutronu zakřivenou trubicí [36]</i>	41
<i>Obr. 6-1: Neorientované MWCNT připravené pro měření</i>	45
<i>Obr. 6-2: Vnitřní struktura uhlíkových nanovláken [29]</i>	46
<i>Obr. 6-3: Orientované MWCNT použité pro měření</i>	47
<i>Obr. 6-4: Schéma reaktoru VR-1 [33]</i>	48
<i>Obr. 6-5: Schéma aktivní zóny reaktoru při prováděných experimentech</i>	49
<i>Obr. 6-6: Rozmístění detektorů v držáku (pohled shora)</i>	50
<i>Obr. 6-7: Schéma umístění měřiče dávkového příkonu s Bonnerovou sférou (pohled shora)</i>	50
<i>Obr. 6-8: Měřicí box s shutterem připevněným na HRK</i>	51
<i>Obr. 6-9: Fotografie držáku vzorků s úhloměrem</i>	52
<i>Obr. 6-10: Schéma experimentálního zařízení, vkládaného do měřicího boxu</i>	53
<i>Obr. 6-11: Grafické znázornění výsledků experimentu 2</i>	61
<i>Obr. 6-12: Rozmístění fólií pro aktivační analýzu</i>	61

<i>Obr. 6-13: Umístění aktivačních detektorů v experimentálním zařízení.....</i>	<i>62</i>
<i>Obr. 6-14: Schématické zobrazení naměřených hodnot aktivační analýzy.....</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 6-15: Relativní rozložení vzhledem ke středu terče</i>	<i>63</i>
<i>Obr. 6-16: Relativní změna při natočení o 1° oproti základní poloze</i>	<i>63</i>
<i>Obr. G-1: Snímek uhlíkové nanotrubky z mikroskopu atomových sil</i>	<i>82</i>
<i>Obr. G-2: Výškový profil uhlíkové nanotrubky</i>	<i>83</i>
<i>Obr. H-1: Otevírání zátky horizontálního radiálního kanálu</i>	<i>84</i>
<i>Obr. H-2: Umísťování a kalibrace experimentálního zařízení</i>	<i>84</i>
<i>Obr. H-3: Otevírání měřicího boxu.....</i>	<i>85</i>
<i>Obr. H-4: Vkládání vzorku do měřicího boxu (grafit)</i>	<i>86</i>
<i>Obr. H-5: Umístění grafitu v experimentálním zařízení</i>	<i>87</i>
<i>Obr. H-6: Umístění neorientovaných CNT v experimentálním zařízení</i>	<i>87</i>
<i>Obr. H-7: Upevnění orientovaných CNT v držáku vzorků</i>	<i>88</i>
<i>Obr. H-8: Načítání dat z ^3He detektorů</i>	<i>89</i>
<i>Obr. H-9: Příprava aktivačních detektorů pro měření</i>	<i>90</i>
<i>Obr. H-10: Měření aktivačních detektorů na gama detektoru</i>	<i>90</i>

SEZNAM TABULEK

<i>Tab. 5-1: Shrnutí optických vlastností vybraných materiálů [8]</i>	<i>38</i>
<i>Tab. 5-2: Rozdělení neutronů podle energií [36].....</i>	<i>42</i>
<i>Tab. 6-1: Shrnutí výsledků měření č. 1 vlastností různých materiálů</i>	<i>57</i>
<i>Tab. 6-2: Shrnutí výsledků měření č. 2 vlastností různých materiálů</i>	<i>58</i>
<i>Tab. 6-3: Shrnutí výsledků experimentu 1</i>	<i>59</i>
<i>Tab. 6-4: Shrnutí výsledků experimentu 2</i>	<i>60</i>
<i>Tab. 6-5: Výsledky měření aktivační analýzou.....</i>	<i>63</i>

SEZNAM SYMBOLŮ A ZKRATEK

AFM	Atomic force microscopy – mikroskopie atomárních sil
ARB	Accumulative Roll Bonding – kumulativní válcování
CNT	Carbon Nanotube – uhlíková nanotruba
CVD	Chemical Vapor Deposition – chemická depozice par
ECAP	Equal Channel Angular Pressing - kanálové úhlové protlačování
ECE	Electro Chemical Etching – elektrochemické leptání
ECD	Electro Chemical Deposition – elektrochemická depozice
FET	Field Effect Transistor – polem řízený tranzistor
FSP	Friction Stir Processing - tření mezi povrchem vzorku a rotujícím nástrojem
HDPE	High Density Polyethylen – polyethylen vysoké hustoty
HPGe	High-purity Germanium – germanium o vysoké čistotě
HPT	High Pressure Torsion – vysokotlaký krut
IGC	Inert Gas condensation - kondenzace v inertním plynu
MWCNT	Multi Wall Carbon Nanotube – vícevrstevná uhlíková nanotruba
PACVD	Plasma-Assisted CVD – plazmou aktivované povlakování
PČ	Palivový článek
PVC	Polyvinylchlorid
PVD	Physical Vapor Deposition – fyzikální depozice par
SWCNT	Single Wall Carbon Nanotube – jednovrstevná uhlíková nanotruba
TE	Torsion Extrusion - protlačování s krutem
UV	Ultra Violet – ultrafialové záření
VLS	Vapour-Liquid-Solid

1 ÚVOD

Nanotechnologie od doby jejich objevení velmi rychle pronikají prakticky do všech oborů lidské činnosti. Materiály na bázi nanostruktur vykazují zcela unikátní vlastnosti, které nelze žádným jiným způsobem napodobit. Ať už se jedná o velmi lehké a pevné kompozity, povlaky, nanovlákná, elektronické součástky nebo dokonce stroje s rozměry v nanometrech, vždy jde o zcela novátorské a jinými materiály nenahraditelné možnosti.

Již nyní je jasné, že lidstvo zřejmě stojí na prahu velkých změn a objevů, které budou možné díky nanotechnologiím. Budou postupně využívány v celé řadě oborů. Jaderná energetika nebude výjimkou, i když nové technologie obecně kvůli zajištění bezpečnosti přijímá velmi pomalu. Vývoj malých modulárních reaktorů, reaktorů čtvrté generace a termojaderných reaktorů však pokračuje a právě tam by nanotechnologie mohly být využity pro zvýšení bezpečnosti, zlepšení parametrů tepelných okruhů, zvýšení účinnosti, vylepšení detektorů a pro ukládání radioaktivních odpadů. Nejdříve je však nutné důkladně prozkoumat vlastnosti různých materiálů za různých podmínek, provést celou řadu výzkumů, simulací a experimentů a dokázat, že jejich použití bude bezpečné jak pro pracovníky, tak pro technologie.

Následující text obsahuje shrnutí současných poznatků z oblasti nanotechnologií a jejich využití zejména v jaderné energetice a výzkumu. Tyto technologie a materiály se však vyvíjejí takovou rychlostí, že je vždy potřeba ověřit zda uvedené informace stále platí. V době psaní této práce jde o nejnovější informace z ověřených zdrojů.

Experimentální část je pak zaměřena na ověření vlastností vybraných nanomateriálů při jejich vystavení proudu neutronů. Bylo navrženo experimentální zařízení a otestováno, jak ovlivňují neutronový tok uhlíkové nanotrubky, nanovlákná, nanodráty a grafit. Výzkum nanomateriálů je zatím v začátcích a není stále stanovena přesná metodika měření a určování vlastností nanomateriálů. Proto je celé měření značně inovativní, byla vyvinuta celá řada postupů a metod, které by se mohly uplatnit i pro další práce a experimenty. Také vyrobené měřicí zařízení jistě najde využití pro další výzkum, kde je třeba ozářit poměrně malý vzorek neutrony z reaktoru. Pro měření byl použit reaktor VR-1 v Praze, ale zařízení by se s jistými úpravami dalo použít i na jiných pracovištích.

2 ÚVOD DO NANOTECHNOLOGIÍ

2.1 Definice a historie

Dle obecně známé definice je nanotechnologií taková technologie, která:

- má alespoň jeden rozměr v intervalu 1 .. 100 nm,
- využívá fyzikálních nebo chemických vlastností na úrovni atomů a molekul,
- může být kombinována s ostatními, vytvářejíce tak větší struktury s účinky v makrosvětě

Z této definice plyne celá řada problémů pro současnou techniku. Největším problémem je výroba struktur o takto malých rozměrech. Je nutno vyvinout zcela nové postupy pro výrobu a další zpracování. V principu lze rozlišit dva různé přístupy k výrobě nanotechnologií. Prvním z nich je takzvaný top-down, neboli inženýrský přístup. Je založen na opakovaném dělení větších struktur na menší, dokud se nedosáhne nanorozměrů. Druhým přístupem je bottom-up, neboli chemický přístup. Ten postupuje obráceně, z menších základních prvků sestavuje prvky větší. Oba tyto postupy se v praxi používají ve srovnatelné míře.

Přestože pojem nanotechnologie je znám pouze několik desítek let, jejich využití sahá již do dávné historie. Například veškeré živé organismy jsou založeny na principech nanotechnologií, jejichž fungování lidstvo objevuje teprve nyní. Dalším příkladem mohou být některé krystaly, které vznikaly tisíce let a jejichž tvar je dán různým uspořádáním na úrovni krystalové mřížky. Asi nejstarší známé, i když nevědomé, využití nanotechnologií lze najít již ve 4. století našeho letopočtu v Římě. Archeologové našli pohár vyrobený ze sodnovápenatého skla obsahujícího nanočástice zlata a stříbra, které výrazně mění jeho barvu [12].

Za zakladatele myšlenky nanotechnologií je označován nositel Nobelovy ceny Richard Feynman [30], který ve své přednášce v roce 1959 předpověděl možnost využití materiálů a procesů na úrovni atomů a molekul. Zásadním zlomem v rozvoji pak je objev mikroskopu atomových sil (AFM) v 80. letech minulého století, který umožnil pozorování a měření dějů na úrovni mikrosvěta. Od této doby dochází k bouřlivému rozvoji nanotechnologií a k publikování celé řady článků a patentů.

Pokud připustíme platnost Moorova zákona o vývoji technologií a srovnáme vývoj nanotechnologií s vývojem elektroniky, zjistíme, že za přibližně 40 let by nanotechnologie mohly ovlivňovat prakticky všechny oblasti lidské činnosti [4].

2.2 Stavba hmoty na úrovni atomů

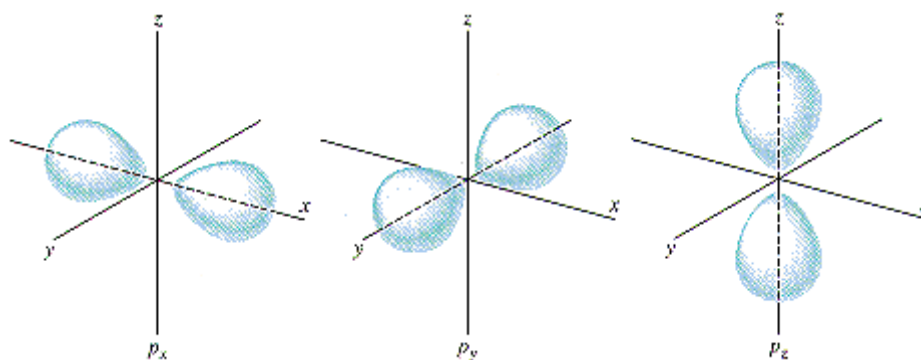
Vzhledem k definici nanotechnologií je jasné, že se pro její pochopení musíme zabývat procesy na úrovni atomů a molekul. V dalších úvahách vyjdeme z Bohrova modelu atomu a vlnové povahy částic, popsané Schrödingerovou vlnovou rovnicí:

$$\frac{1}{r} \cdot \frac{\partial^2}{\partial r^2} (r\psi) + \frac{1}{r^2} \cdot \left\{ \frac{1}{\sin \vartheta} \cdot \frac{\partial}{\partial \vartheta} \left(\sin \vartheta \frac{\partial \psi}{\partial \vartheta} \right) + \frac{1}{\sin^2 \vartheta} \cdot \frac{\partial^2 \psi}{\partial \varphi^2} \right\} = -\frac{2m}{\hbar^2} \left(E + \frac{e^2}{r} \right) \psi, \quad (2.1)$$

kde r je poloměr orbitalu, E je energie, \hbar je Planckova konstanta, ψ je de Brogliho vlna [15]. Řešení této rovnice pak má za parametry celkem čtyři kvantová čísla:

- $n = 1, 2, 3, \dots \infty$ – hlavní, určuje energii orbitalu a jeho velikost
- $l = 0 \dots n - 1$ – vedlejší, určuje tvar orbitalu
- $m = -1 \dots 0 \dots 1$ – magnetické, určuje prostorovou orientaci orbitalu
- $m_s = -1/2, +1/2$ – magnetické spinové, udává spin elektronu (vnitřní moment hybnosti)

Obsazování jednotlivých orbitalů je dáno snahou dosáhnout stavu s nejnižší možnou energií. Sféricky symetrická řešení vlnové rovnice s $l = 0$ jsou označována jako orbitály typu s. Sféricky nesymetrická pak podle počtu elektronů, které mohou obsahovat p (pro $l = 1$), d (pro $l = 2$) a f (pro $l = 3$). Tyto orbitály se pak postupně obsazují elektrony podle následujícího pořadí: 1s, 2s, 2p, 3s, 3p, 3d, 4s. Obsazenost jednotlivých orbitalů elektrony pak ovlivňuje možnosti a způsoby navázání stabilní vazby s dalšími atomy. Možné tvary orbitalu typu p ukazuje obrázek Obr. 2-1. [24]



Obr. 2-1: Možné tvary orbitalu p [24]

2.2.1 Chemické vazby mezi atomy

Schopnost atomu přitahovat vazebné elektrony a tudíž i tvořit chemické vazby se nazývá elektronegativita. Největší elektronegativitu mají prvky skupiny VII A Mendělejevovy periodické

tabulky, tedy halogenidy. Podle rozdílu hodnot elektronegativit dvou prvků, které spolu tvoří vazbu se rozlišují následující typy chemických vazeb [1]:

- iontová vazba – při velkém rozdílu elektronegativit, dochází k odtržení e^- z obalu elektropozitivnějšího prvku ve prospěch elektronegativnějšího za vzniku iontů,
- polární vazba – e^- jsou přitahovány k prvku s vyšší elektronegativitou, jsou rozděleny nerovnoměrně a vzniká elektrický dipól,
- kovalentní vazba – sdílení elektronů, při minimálním rozdílu elektronegativit,
- kovová vazba – uvolňování valenčních e^- do meziatomového prostoru, vazba tedy působí na celý krystal.

Na vzniku vazeb se podílí hlavně orbitaly typu s a p. Prostorová orientace orbitalu p (Obr. 2-1) má pak zásadní vliv na tvar celé molekuly.

2.2.2 Hybridizace

Hybridizace je proces energetického sjednocení původně nerovnocenných orbitalů. Hybridizovány jsou ty orbitaly, které poskytují e^- k utváření kovalentních vazeb. Typ hybridizace atomu potom určuje uspořádání atomů v mřížce a může měnit vlastnosti materiálu v makrosvětě. Například uhlík v hybridizaci sp^3 (tetraedr) vytváří vazebnou pozici na základně čtyřstěnu tvořeného třemi orbitaly p. Jedná se v tomto případě o formu nazývanou diamant se zcela unikátními vlastnostmi. Tentýž uhlík v hybridizaci sp^2 vytváří vazbu na spojnici os p orbitalů, nehybridizovaný orbital p pak mezi sebou vytváří dvojnou vazbu známou u uhlovodíků. V případě čistého uhlíku se benzenová jádra uspořádávají do tvaru šestiúhelníků a vzniká grafenový list – jedna vrstva grafitu s vlastnostmi zcela odlišnými. [12]

2.3 Krystalová struktura hmoty

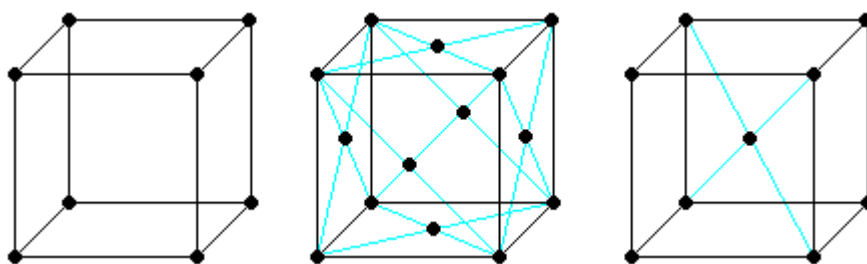
Kromě již zmiňovaných chemických vazeb se na vzájemném vázání atomů podílejí také vazby fyzikální. Jedná se o Van der Waalsovy síly, které mají nižší silové působení než vazby chemické a mají také kratší dosah. Vyskytují se ale u všech typů látek. Pokud se jednotlivé částice uspořádávají pravidelně, i když je jich velký počet, jedná se o hmotu krystalickou. [12]

Krystalem potom nazýváme pravidelné třírozměrné periodické uskupení atomů. Základní krystaly jsou tvořeny pouze jedním druhem atomů. Struktura krystalu je popsána pomocí mřížky a skupiny atomů uspořádaných v této mřížce. Tato skupina se nazývá báze. Krystal pak tvoří opakování této báze v prostoru. Mřížka je tvořena primitivními buňkami – rovnoběžnostěny. Tvar těchto buněk potom určuje typ krystalové soustavy [16]. Délka hrany kubické základní buňky se nazývá mřížková konstanta a . Tato kubická mřížka může být prostá, prostorově středěná nebo plošně středěná, jak ukazuje obrázek Obr. 2-2. Kromě kubických mřížek mohou vznikat také mřížky složitější, např. hexagonální, tetragonální, trigonální, jednoklonná a trojklonná. [26]

Polohu a orientaci libovolné krystalové roviny lze popsat třemi indexy, sestavenými následujícím způsobem:

- Nejdříve se naleznou průsečíky roviny s osami a , b , c a vyjádří se jejich polohy pomocí mřížkových konstant.
- Převrácené hodnoty těchto čísel se převedou na celá čísla se stejným poměrem.
- Výsledek se zapíše v kulatých závorkách jako $(h\ k\ l)$, např. $(0\ 1\ 0)$.
- Jestliže rovina protíná osu v záporné poloze, označí se index čarou nad indexem, např. $(\bar{h}\ k\ l)$.

Podle těchto pravidel jsou např. stěny kubického krystalu určeny rovinami $(1\ 0\ 0)$, $(0\ 1\ 0)$, $(0\ 0\ 1)$, $(\bar{1}\ 0\ 0)$, $(0\ \bar{1}\ 0)$, $(0\ 0\ \bar{1})$. [16]



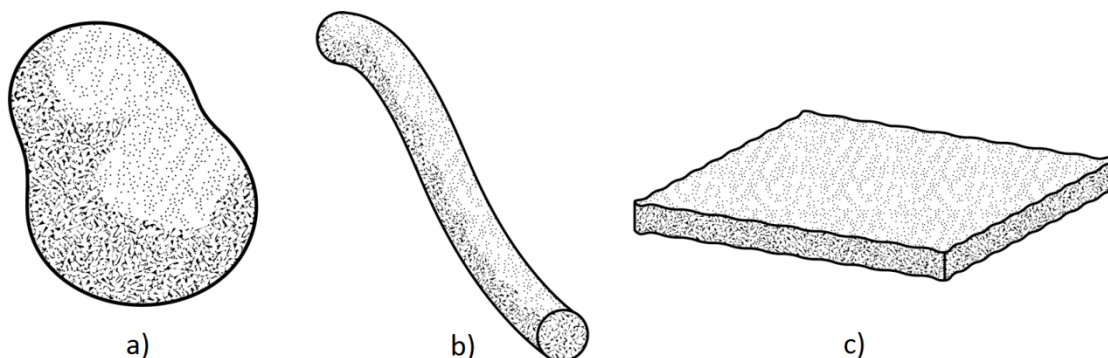
Obr. 2-2: Druhy kubických mřížek - zleva prostá, prostorově středěná, plošně středěná [26]

2.4 Typy nanoobjektů

Díky faktu, že nanoobjektem můžeme nazývat obecně objekt, který má jakýkoliv rozměr v intervalu 1 – 100 nm, můžeme rozlišovat různé typy těchto objektů. Dle normy ISO/TS 27687 je základním parametrem pro třídění počet souřadnic, které splňují toto kritérium [14]:

- nanočástice – nanorozměrů ve všech třech osách,
- nanovlákná – nanorozměry ve dvou osách,
- nanodesky – nanorozměr pouze v jedné ose.

Příklady těchto objektů ukazuje obrázek Obr. 2-3. Do těchto kategorií lze zařadit celou řadu různých nanomateriálů. Kromě toho lze také připravit v kombinaci klasického materiálu s nanomateriálem nanokompozity (směs s pevným materiálem) nebo nanotekutiny (ve směsi s kapalinou či plynem).



Obr. 2-3: Základní typy nanoobjektů - a) nanočástice, b) nanovláknko, c) nanodeska [14]

2.4.1 Nanočástice

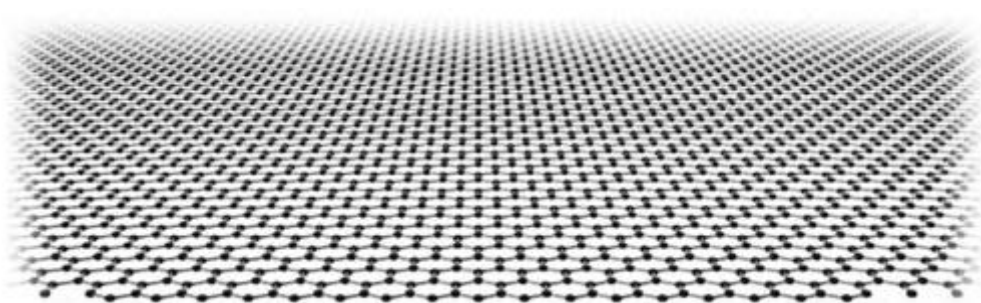
Mezi nanočástice lze řadit kromě samostatných nanočástic – většinou nanokrystalů – také vrstvy a povlaky tvořené nanokrystaly, porézní materiály a nanopěny, kvantové tečky, objemové nanomateriály a nanostroje s určitými vlastnostmi. [12]

2.4.2 Nanovlákná

Do kategorie nanovláken lze zařadit samotná nanovlákná (*nanofibers*), nanopásky (*nanoribbons*) – nanovlákná přibližně pravoúhlého tvaru, nanotyče (*nanorods*) – přímá plná nanovlákná, nanotrubky (*nanotubes*) – dutá nanovlákná, nanodráty (*nanowires*) – elektricky vodivá nebo polovodivá nanovlákná, kvantové dráty, pilíře (*pillars*). [12]

2.4.3 Nanodesky

Do této kategorie můžeme řadit např. tenké vrstvy – povlaky, deskovité nanokrystaly, kvantové jámy, nanostěny, rovinné makromolekuly – např. grafenový list. Příklad takové struktury je na obrázku Obr. 2-4. [12]



Obr. 2-4: Příklad grafenového listu [11]

3 METODY VÝROBY NANOMATERIÁLŮ

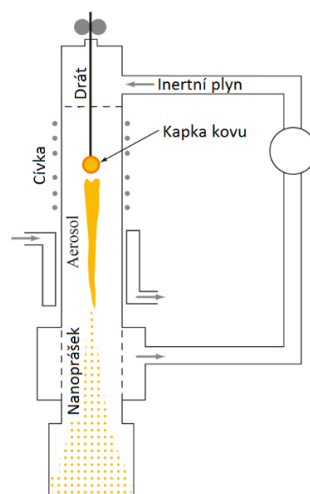
Pro správné pochopení možností, které nanomateriály v současnosti poskytují, je velmi důležité mít přehled o tom, jak se vyrábějí. Ne všechny výrobní procesy jsou totiž v současnosti zcela ovládnuty a ne všechny druhy nanomateriálů je současný průmysl schopen vyrobit. Proto je třeba brát ohled na to, jaké jsou v současnosti a budou v blízké budoucnosti možnosti. Základní metody výroby shrnuje tato kapitola.

3.1 Výroba nanočástic

Pro výrobu nanočástic a obecně jakýchkoliv nanomateriálů se dají využít jak top-down, tak bottom-up metody. Bottom-up metody jsou historicky starší, protože jsou většinou velmi jednoduché. Např. při zahřátí směsi roztoků kyseliny chlorozlatité HAuCl_4 ve vodě, uhličitanu sodného Na_2CO_3 ve vodě a anionu kyseliny fosforečné H_2PO_2^- v dietyléteru na teplotu 70°C po dobu 1 hodiny vzniknou koloidní nanočástice zlata o velikosti 2 – 5 nm. Podobně při jednoduchém elektrolytickém rozpouštění stříbra v destilované vodě dochází k tvorbě koloidního stříbra. Další metody výroby jsou popsány níže.

3.1.1 Syntéza v plynné fázi (*Gas Phase Synthesis*)

Jde o poměrně jednoduchou metodu, při které lze vznikající aerosol rychle zahřívat nebo chladit a dosáhnout tak tvorby nanočástic velmi přesně definovaných rozměrů s malými odchylkami. Chemická reakce může být realizována např. syntézou nebo spalováním v plameni, syntézou v plazmě, elektrickém oblouku, pyrolýzou nebo chemickou kondenzací z plynné fáze, ozářením laserem, UV nebo rentgenovým zářením. Příklad využití této metody je na obrázku Obr. 3-1, kde je ilustrována výroba kovového nanoprášku. [10]



Obr. 3-1: Výroba kovového nanoprášku metodou syntézy v plynné fázi [10]

3.1.2 Syntéza Sol-Gel procesy (*Sol-Gel Processing*)

Jde o mokré procesy, kde se do roztoku přidávají kromě prekurzorů (látky účastníci se reakce) i stabilizátory (upravují a zastavují průběh reakce). Stabilizace se může provádět buď elektrostatickou metodou, sférickou stabilizací, nebo sféricko-elektrickou stabilizací.

Elektrostatická stabilizace využívá odpuzivých sil mezi povrchy stejně nabitých částic. Roztok se však po stabilizaci nenachází ve stabilním stavu, ale ve stavu metastabilním. Při změně účinnosti roztoku pak může dojít k destabilizaci nanočástic.

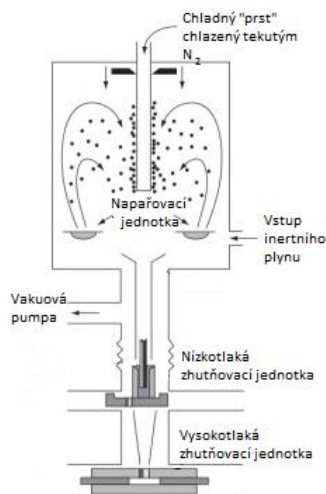
Sférická stabilizace je nejčastěji využívanou metodou. Dochází při ní k fyzikální nebo chemické hromadění organických molekul s dobrou rozpustností v roztoku na povrchu v tomto roztoku nerozpustné částice. Přes vrstvu nahromaděných molekul pak k částici neproniknou nové molekuly a její růst se zastaví. Částice je potom stabilnější a není náchylná na změnu koncentrace roztoku. Navíc lze v případě potřeby obal opětovně rozpustit a reakci znovu rozběhnout.

Sféricko-elektrická stabilizace je potom kombinací těchto dvou metod, stabilizační účinky závisí na velikosti a elektrickém náboji nerozpustné částice. [12]

3.1.3 Příprava top-down metodami

Jde o metody obrácené k metodám bottom-up, tedy rozbíjení makroskopického materiálu na menší částice. Nejvíce využívanou metodou i v komerční sféře je vytváření nanočástic drcením v kulových mlýnech. Takto lze vyrábět i velké množství nanomateriálu ve speciálních mlýnech plněných inertním plynem nebo vakuovaných. Vyrábějí se tak částice o velikostech pod 10 nm.

Dále lze materiály dělit také například laserem, odpařováním, kavitací nebo elektrickým a plazmovým rozprašováním. Nejrozšířenější je metoda kondenzace v inertním plynu (IGC – *Inert Gas Condensation*). Při této metodě proudí kovové páry od horkého povrchu směrem do chladného inertního plynu, kde se srážejí s jeho atomy a ztrácejí kinetickou energii. Částice jsou sbírány na chladném povrchu. Metoda se musí provádět v čistém prostředí pro zajištění čistoty povrchu pro usazování částic. Schéma této metody je na obrázku Obr. 3-2. [28]



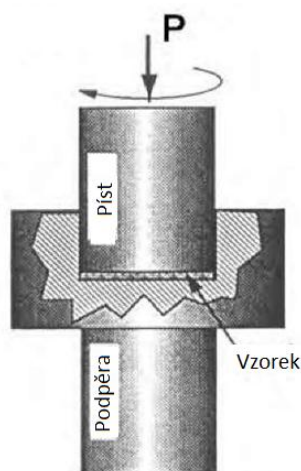
Obr. 3-2: Příklad metody IGC [28]

3.1.4 Výroba nanokrystalických materiálů

Příprava materiálů z nanokrystalů dává vzniknout materiálům s celou řadou zajímavých vlastností. Se zmenšujícím se rozměrem zrn roste pevnost materiálu, může se projevit jeho superelastická nebo např. zlepšení elektrické vodivosti. Metody přípravy se dělí na jednofázové a vícefázové. Výhodou jednofázových metod je příprava materiálů se strukturou prakticky bez pórů a trhlin.

Mezi jednofázové metody patří bottom-up metody, například metoda napařování (*sputtering*), napařování elektronovým nebo iontovým svazkem nebo plazmou (*Plasma Thermal Spraying*), elektrodepozicí nebo fyzikální či chemická depozice (PVD – *Physical Vapour Deposition*, CVD – *Chemical Vapour Deposition*). Objem materiálů připravovaných těmito metodami je ale velmi malý. Top-down metody potom zahrnují kanálové úhlové protlačování (ECAP – *Equal Channel Angular Pressing*), vysokotlaký krut (HPT – *High Pressure Torsion*), protlačování s krutem (TE – *Torsion Extrusion*) a další. Zatím pouze metoda HPT je však schopna vytvořit zrna o velikosti do 100 nm v celém objemu vzorku.

Příklad metody HPT je na obrázku. Touto metodou lze ve vzorku vytvořit velký počet deformací a tím zrna o velikosti nm. Struktura zrn je přitom velmi konzistentní ve všech směrech. Při výrobě je přípravek vystaven vysokému zatížení stříhovou deformací a tím vytvoření vad v krystalové mřížce. Zahřívání látky potom způsobuje další zjemnění zrn a dosažení stabilnější struktury. Teploty přitom dosahují přibližně jedné třetiny teploty tavení daného materiálu [34]. Metoda je však zatím nevyužitelná v průmyslové výrobě, na větší množství materiálu se používá metoda podobná – metoda tření mezi povrchem vzorku a rotujícím nástrojem (FSP – *Friction Stir Processing*).



Obr. 3-3: Příklad metody HPT [34]

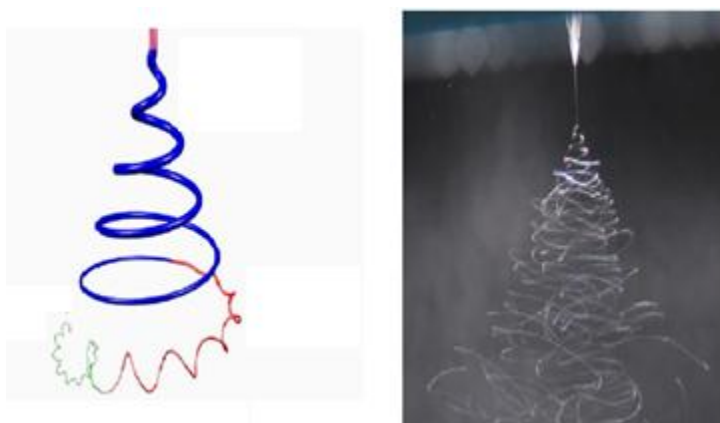
Perspektivní a komerčně využitelnou metodou se jeví také metoda kumulativního válcování (ARB – *Accumulative Roll Bonding*), která vychází z dávno známých principů výroby damascenské oceli – dva plechy jsou k sobě sválcovány na přibližně 50% své původní šířky. Potom se přeloží a opět sválcují. Tím lze dosáhnout velikosti zrn až 50 nm, ovšem s poměrně velkým rozptylem velikostí. [12]

3.2 Výroba nanovláken

Pro výrobu nanovláken lze využít řadu metod používaných pro výrobu nanočástic. Jde například o elektrochemickou depozici, CVD, PVD a další. Je nutno pouze změnit některé podmínky reakce, např. tlak a teplotu, volit vhodné prekurzory a dopanty. Potom mohou vznikat podlouhlé nanočástice typu pásků, drátů nebo trubek. Následující text popisuje další použitelné metody výroby.

3.2.1 Metoda elektrovlákňování (*Electrospinnig*)

Metoda elektrovlákňování je nejpoužívanější metodou pro výrobu nanomateriálů v České republice. Byla úspěšně zdokonalena pro komerční využití na Technické univerzitě v Liberci a firmou Elmarco. Ta vyvinula technologii Nanospider™, která je schopna zvlákňovat nejen za pomoci kapiláry z kapky polymeru, ale také z tenké vrstvy povrchu, a tím celý proces urychlila. Metoda je založena na průchodu polymeru elektrostatickým polem o vysoké intenzitě směrem od kapiláry k uzemněné podložce (kolektoru). Jelikož je kapilára nabitá, přenesse se na polymer elektrický nábor. Při vytlačení z kapiláry je pak vlákno polem rozpořbováno, protaženo a zúženo. Dále po cestě se tento proces opakuje a tak lze dosáhnout rozměrů vláken až 80 nm. Rozměry a strukturu tkaniny lze dále měnit složením polymeru, velikostí kapiláry, velikostí přiloženého napětí nebo použitím různých kolektorů pro usazování – např. použitím rotujícího válce lze dosáhnout vysoce orientovaných nanovláken. [23]



Obr. 3-4: Průběh zvlákňování metodou electrospinningu [23]

3.2.2 Metoda Vapour-Liquid-Solid (VLS)

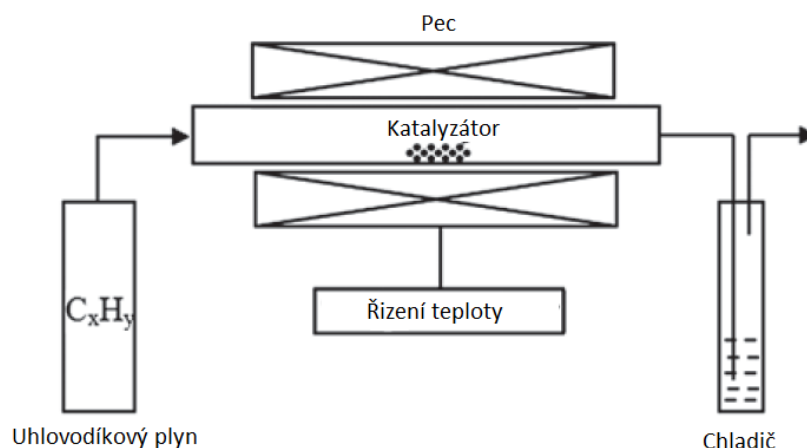
Tato metoda byla vyvinuta speciálně pro tvorbu nanodrátů a nanotyčí procesem krystalizace. V principu využívá nárůstu tlaku par nad velmi zakřiveným povrchem. Tento povrch se vytvoří pomocí katalyzátoru tvořeného velmi malou kapičkou kovu, např. zlata. Na jeho povrchu potom dochází ke krystalizaci par použitého materiálu. Celý proces se dá snadno řídit změnou tlaku a složením plynu použitého materiálu. [12]

3.2.3 Elektrochemické metody

Elektrochemické metody lze využít pro tvorbu nanopilířů, děr nebo dvourozměrných nanostěn. Jedná se o metody elektrochemické depozice (ECD – *Electro Chemical Deposition*) a elektrochemického leptání (ECE – *Electro Chemical Etching*). Metoda ECD je založena na metodě galvanického pokovování z roztoku za průchodu elektrického proudu. Její výhodou je velmi levný provoz a technologicky zvládnutý postup. Pro nanášení vrstev složitých tvarů lze na podložku nanést nejdříve masku, která se po dokončení procesu odleptá. Metoda ECE je podobná, ale při průchodu proudu roztokem dochází k leptání povrchu daného vzorku. [12]

3.2.4 Metoda chemické depozice par (CVD)

Metoda CVD, neboli chemická depozice par, je jednou z nejpoužívanějších metod pro výrobu nanovláken, zejména nanotrubek. Byla vyvinuta v roce 1890 ve Francii. Je založena na průchodu uhlovodíkových par skrz trubkovitý reaktor, ve kterém se nachází katalyzátor o vysoké teplotě (600 – 1200 °C). Zde se uhlovodík rozloží a v chladnější oblasti reaktoru je sbírán za současné tvorby nanostruktur. Jednoduché schéma této metody je na obrázku Obr. 3-5.

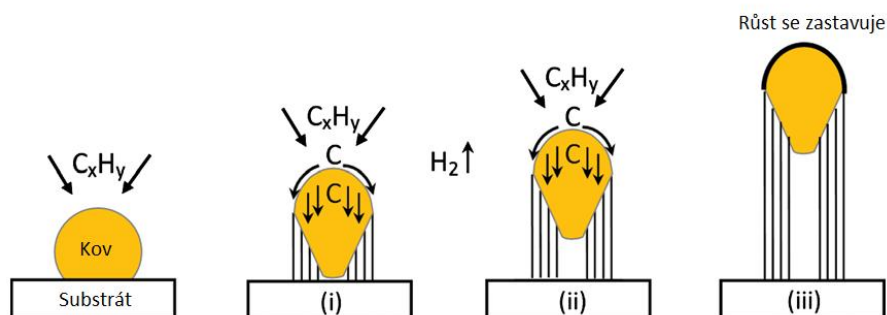


Obr. 3-5: Schéma metody CVD [19]

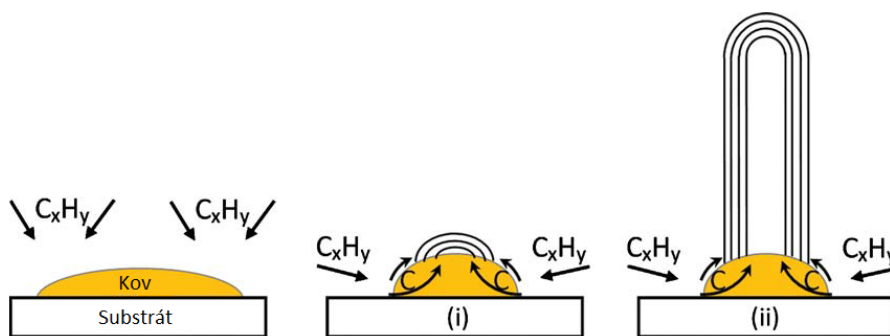
Nejpoužívanějšími uhlovodíky pro tvorbu plynu jsou metan, etylen, acetylen, benzen a xylen. Lze ale použít i další látky, např. cyklohexan nebo fulereny. Jako katalyzátor se potom používají nanočástice různých kovů, nejčastěji železo, kobalt, nikl nebo zlato. Výsledné nanotrubky mohou vznikat buď jako jednostěnné (SWCNT – *Single Wall Carbon Nanotubes*) nebo jako víceštěnné (MWCNT – *Multi Wall Carbon Nanotubes*). Jejich struktura záleží na použitých materiálech a teplotě v reaktoru. Jsou známy dva možné způsoby růstu nanotrubek [19]:

- kapkový model – katalyzátor se oddělí od podložky, uhlovodíkový plyn jej obtéká a nanotrubka vzniká pod kapkou (Obr. 3-6),
- základnový model – nanotrubka vzniká na základně tvořené katalyzátorem a zvedá nad sebou zbytek již vytvořené trubky (Obr. 3-7).

Na Fakultě strojního inženýrství VUT v Brně se metoda CVD používá pro růst grafenových destiček. Konkrétně se používá směsi vodíku a metanu, jako katalyzátor zlato a teploty v reaktoru dosahují až 1000 °C [25]. Jejich přístroje by se teoreticky dalo využít pro růst nanotrubeček pro experiment s vedením neutronů, pokud by se podařilo vyrobit nanotrubečky dostatečně rovné a orientované.



Obr. 3-6: Kapkový model metody CVD [19]



Obr. 3-7: Základnový model metody CVD [19]

3.3 Výroba nanodesek

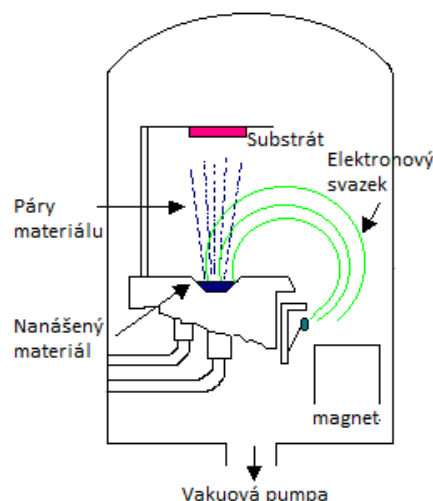
3.3.1 Metoda fyzikální depozice vrstev (PVD)

Metoda fyzikální depozice vrstev je metodou nejvíce průmyslově využívanou. Jde o techniky vakuového napařování nebo různé způsoby napařování. V případě vakuového napařování je substrát vložen do vakuové komory, kde se nechává odpařovat nanášený materiál, nejčastěji formou ohmického ohřevu. Odpařený materiál se volně šíří všemi směry a rovnoměrně pokrývá povrch kulové plochy. Chceme-li tedy pokrýt rovinou desku materiálem, musíme ji umístit dostatečně daleko od zdroje par, aby poloměr koule byl co největší a pokrytí co nejrovnoměrnější. Hmotnost potřebného odpařovaného materiálu m určíme podle rovnice:

$$m = 4\pi \cdot L^2 \cdot d \cdot \rho \cdot k, \quad (2.1)$$

kde ρ je hustota nanášeného materiálu, L je vzdálenost zdroje par od substrátu a k je experimentálně zjištěný koeficient respektující typ zdroje par a tvar vakuové komory.

Další používanou metodou je metoda naprašování. U této metody nedochází k odpařování materiálu, ale jeho rozprášení např. působením plazmy, silného magnetického pole, vysokofrekvenčního elektrického pole, iontového svazku nebo elektronového svazku, jak ukazuje obrázek Obr. 3-8. [35]



Obr. 3-8: Metoda PVD využívající elektronový svazek [35]

3.3.2 Metoda CVD

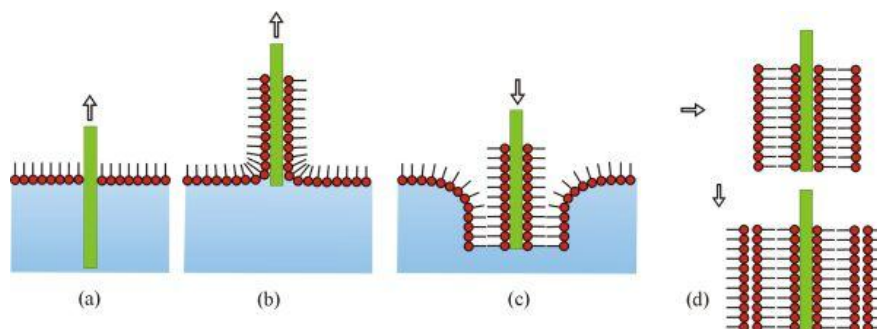
Pro výrobu materiálů typu nanodesek lze s úspěchem použít i metodu CVD zmiňovanou již v kapitole 3.2.4. Pouhou modifikací teploty, tlaku, použitých materiálů a průtoku plynu lze pak na substrátu vyrábět i nanodesky, např. grafenové listy. Nejběžněji používanou modifikací této metody je metoda tepelná, existují však i jiné druhy. Např. metoda plazmou aktivovaného povlakování (PACVD - *Plasma-Assisted CVD*), která k aktivaci chemických procesů používá proud plazmy. Ta způsobuje zahřívání, ionizaci a disociaci nanášeného materiálu. Používá se zpravidla doutnavého výboje – studené plazmy. [12]

3.3.3 Výroba samoorganizací

Proces samoorganizace je základním procesem, kterým vznikají živé organizmy. Důvodem k samoorganizaci molekul mohou být hydrofilní a hydrofobní interakce, kapilární, Van der Waalsovy nebo Coulombovy síly, vodíkové můstky nebo jiné účinky. Vždy však vedou ke snaze dosáhnout silové rovnováhy, a tím vzniku uspořádaných struktur široké škály velikostí. Velkou výhodou je jednoduché provedení, které umožňuje velkoobjemovou výrobu. [12]

Příkladem samoorganizace může být tvorba LB filmů (film Langmuirův a Blodgettové). Tento proces ukazuje obrázek Obr. 3-9. Film se na materiál může nanášet např. vytahováním

destičky z kapaliny pokryté filmem – Obr. 3-9 a) a b). Proces ponořování lze libovolně opakovat a tak dosáhnout vícevrstvého filmu - Obr. 3-9 c) a d). Kromě metody ponořovací se používá také metoda dotyková – přenosem na vlhkou podložku dotýkající se jednou hranou kapaliny pod fázovým rozhraním – a metoda vytahovací – přenosem na hydrofilní podložku orientovanou paralelně k fázovému rozhraní. [37]



Obr. 3-9: Pokrývání povrchu destičky LB filmem [37]

3.4 Výroba nanokompozitních materiálů

Nanokompozit je pevný materiál, který se skládá ze dvou a více materiálů, z nichž minimálně jeden je nanomateriálem. Nanokompozity se běžně vyskytují v přírodě, např. ve schránkách korýšů nebo v kostech. Důvodem k jejich použití je výrazné zlepšení zejména mechanických vlastností takových materiálů a díky velké aktivní ploše nanostruktur lze dosáhnout výrazného zlepšení při poměrně malé hmotnosti. Nanokompozity lze v současnosti rozdělit do tří hlavních skupin podle základního nosného materiálu (matrice) [12]:

- nanokompozity s kovovou maticí
- nanokompozity s keramickou maticí
- nanokompozity s polymerní maticí

3.4.1 Nanokompozity s kovovou maticí

Nanokompozity s kovovou maticí obsahují kromě základního kovu také zrna o velikosti nanometrů. Základní kov potom udává základní mechanické vlastnosti materiálu, jako tuhost, pevnost, vodivost, zatímco nanomateriál může zvyšovat jeho modul pružnosti a pevnosti, zlepšovat jeho odolnost proti otěru a korozi a proti vysokým teplotám. Nejčastěji používanými materiály matic pak jsou zejména hliník, titan, měď, nikl, železo a jejich slitiny. Přidávaným nanomateriálem pak bývají keramické nanočástice, dráty nebo vlákna.

Pro výrobu těchto kompozitů je snaha používat pokud možno standartní hutnické metody kvůli nutnosti výroby velkých objemů. Nejčastěji se používají metody rozprašování a tavení práškových materiálů nebo jejich mechanické slévání. Největším problémem se zatím jeví nedostatečná homogenita kompozitu ve všech směrech. Té se výrobci snaží dosáhnout využitím

chemických procesů přímo v tavenině budoucí matrice. Výsledné kompozity pak mají výrazně lepší vlastnosti a větší teplotní odolnost. [12]

3.4.2 Nanokompozity s keramickou maticí

U těchto kompozitů je nosným materiálem keramika. Výrobou kompozitu se potom snažíme odstranit neduhy keramiky, jako jsou křehkost, nepoddajnost nebo elektrická nevodivost. Díky vysoké teplotě tavení keramiky je nutno pro výrobu používat mechanické slévání v kulových mlýnech nebo např. sol-gel procesy. Tak lze vytvářet například nanokompozitní aerogely s vysokým podílem vzduchu (až 99,98%). Výsledný pórovitý kompozit má potom výborné izolační vlastnosti.

Aerogely se dají vyrábět sol-gel procesy. Bohužel však nemají dostatečné mechanické vlastnosti, např. mají malou pevnost v tlaku a odolnost proti smyku a krutu. Tyto vlastnosti se dají vylepšit přidáním dalších nanomateriálů např. pomocí CVD metod. Takto lze vyrobit např. křemeno/uhlíkové aerogely s vysokou pevností a elektrickou vodivostí. [12]

3.4.3 Nanokompozity s polymerní maticí

Kompozity s polymerní maticí jsou nejrozšířenějším a nejstarším typem nanokompozitů. Používají se zejména jako konstrukční a funkční materiály ve všech průmyslových oborech. Jejich hlavními výhodami jsou nízká energetická náročnost výroby, snadná zpracovatelnost, korozní odolnost, nízká hustota a výborné elektroizolační vlastnosti. Nevýhodami jsou ale nízká mechanická pevnost, malá teplotní odolnost, stárnutí a hořlavost. Proto je velká snaha neustále vyvíjet nové typy těchto materiálů se stále lepšími vlastnostmi. Pro výrobu těchto kompozitů se využívá celá škála metod, které značně závisí na použitých materiálech matrice i plniv. [12]

3.4.4 Výroba nanotekutin

Nanotekutiny jsou látky, které obsahují zpravidla pevné nanomateriály různých struktur. Mohou to být různé směsi kapalin a plynů s nanočásticemi, kapalné krystaly nebo různé typy gelů a biologických roztoků. Mají zpravidla neobvyklé optoelektronické, termomechanické, chemické a biologické vlastnosti. Zajímavé vlastnosti mají také magnetické nanotekutiny, u nichž lze magnetickým polem ovládat jejich proudění.

Nanotekutiny se dají vyrábět buď jednofázovým, nebo dvoufázovým procesem. Při dvoufázovém procesu jsou nejdříve vyrobeny nanočástice, které jsou následně rozmíchány v původní kapalině. Pro nanokapaliny s čistě kovovými nanočásticemi se pak používají metody jednofázové. Při tomto procesu se částice vytvářejí a rozmíchávají přímo v kapalině, čímž se zabraňuje jejich oxidaci. Toho lze dosáhnout např. metodami CVD, sol-gel procesy nebo IGC metodou. [12]

4 DRUHY NANOMATERIÁLŮ A JEJICH POUŽITÍ

Tato kapitola shrnuje některé druhy materiálů podle základních prvků, ze kterých jsou vyrobeny. Dále diskutuje jejich využití jak v běžném průmyslu, tak v jaderné energetice a výzkumu. Nutno poznamenat, že výsledky studií na nanomateriálech se autor od autora místy značně odlišují. Je to dáno zejména tím, že vlastnosti nanomateriálů se velmi mění s jejich strukturou a velikostí. Jednotlivé studie proto nelze jednoznačně porovnávat, dávají však podnět k dalším úvahám a možnostem.

4.1 Uhlíkové nanomateriály

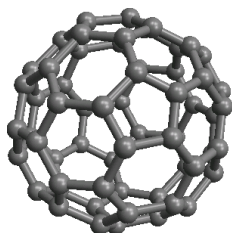
Uhlíkové nanomateriály jsou jedny z nejperspektivnějších známých materiálů. Díky svým unikátním vlastnostem, které se diametrálně odlišují u každé strukturní varianty uhlíku, mohou mít celou škálu využití. Nejznámějšími příklady strukturní variability uhlíku jsou jeho formy grafit a diamant. Každá forma se chová úplně jinak, grafit je velmi měkký a má malý elektrický odpor, zatímco diamant je jeden z nejtvrdších materiálů vůbec a je velmi dobrý elektrický izolant. Uhlíkové atomy jsou k sobě vázány především kovalentními vazbami, díky kterým má vysokou teplotní odolnost. V závislosti na typu hybridizace uhlíku pak vznikají různá krystalová uspořádání: např. diamant, grafit nebo grafen a nově objevený lonsdaleit [22]. Kromě těchto známých forem uhlíku existuje ještě celá řada dalších, které jsou uměle vyráběny. Z nanomateriálů jsou to například fullereny a nanotrubky. Právě těmto formám je věnován následující text. [12]

4.1.1 Fullereny

Objev fullerenů byl pro vědu tak důležitý, že byl dokonce oceněn Nobelovou cenou za chemii v roce 1996 [7]. Jde o vysokomolekulární sloučeniny čistého uhlíku s nejčastěji sudým počtem atomů a nejčastějším výskytem molekul C_{60} a C_{70} . Mohou se skládat ale i z obrovských molekul z několika stovek až tisíců atomů uhlíku. Molekuly se vždy skládají z 20 pětiúhelníků uhlíkových atomů a k šestiúhelníků, kde pro k platí:

$$k = \frac{n}{2} - 10, \quad (4.1)$$

kde n je celkový počet uhlíkových atomů daného fullerenu [12]. Ukázka struktury molekuly fullerenu C_{60} je na obrázku Obr. 4-1.



Obr. 4-1: Fulleren C_{60} [39]

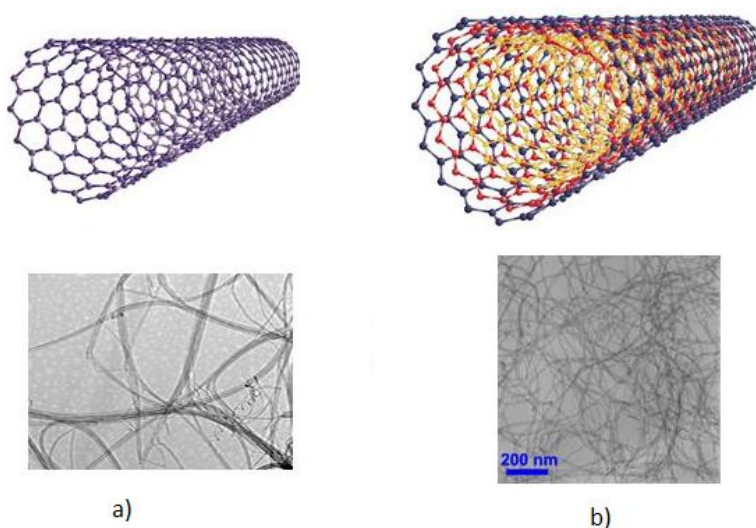
Fullereny mají celou řadu zajímavých vlastností. Vyznačují se vysokou mechanickou odolností, při nárazu na tvrdou podložku se pružně odrazí. Mají také vysokou reaktivitu s jinými molekulami určitých druhů. Navíc mají schopnost tyto molekuly uzavřít ve svém středu.

Nejčastějšími aplikacemi fullerenů je jejich použití při výrobě syntetických diamantů, kdy snižují tlak a teplotu potřebnou v procesu tvorby. Dále se používají v LED diodách a solárních článcích. V solárních článcích se fullerénová molekula chová jako akceptor elektronu s velmi krátkým časem jeho přenosu mezi donorem a akceptorem a téměř 100% kvantovou účinností. Řetězce fullerénových jader pak slouží také jako vodiče získaného náboje. Takovéto články jsou velmi levné a ohebné, mají však prozatím nízkou účinnost a krátkou životnost.

Dále mohou být fullereny použity pro lékařské aplikace, přičemž slouží k transportu a navázání léčiv na specifické receptory buněk a virů. Toho se dá využít např. při léčbě nádorových onemocnění. Všechny aplikace fullerenů jsou zatím úplně nové a ve stádiu vývoje, předpokládá se jejich rychlý rozvoj [12]. Jejich možné použití v jaderné energetice není zatím známo, ani se o nich prozatím neuvažuje, mohly by se však stát součástí řídicí elektroniky.

4.1.2 Nanotrubky

Uhlíkové nanotrubky (*Carbon Nanotube* – *CNT*) jsou bezpochyby jedním z nejperspektivnějších nanomateriálů vůbec. Jejich spektrum využití je opravdu obrovské. Jedná se v podstatě o grafenový list stočený do tvaru trubky. Díky vlastnostem vazeb v grafenu pak trubka dostává velmi zajímavé vlastnosti, jako např. obrovskou pevnost v tahu, vysokou elektrickou a tepelnou vodivost, vysokou tepelnou odolnost a mechanickou poddajnost. Tyto vlastnosti se mění podle jednotlivých typů trubek. Trubky pak mohou být jednostěnné (*SWCNT* – *Single Wall Carbon Nanotube*) nebo víceštěnné (*MWCNT* – *Multi Wall Carbon Nanotube*). Největší elektrickou vodivost vykazují jednostěnné trubky, zatímco největší mechanickou pevnost dvou a tříštěnné. S dalším přidáváním stěn se tato vodivost zmenšuje a přibližuje se vlastnostem grafitu. Ukázky nanotrubek jsou na obrázku Obr. 4-2. V závislosti na vnitřním uspořádání trubek pak tyto mohou vykazovat buď vodivé, nebo polovodivé vlastnosti.



Obr. 4-2: Ukázka a) SWCNT a b) MWCNT [1]

Průměry trubek se mohou pohybovat od 0,6 nm do 2 nm. Mohou vznikat trubky jak otevřené, tak na koncích uzavřené. Nemusejí mít po celé délce konstantní průměr. Pro správné vlastnosti materiálu je však vždy důležitá jeho chemická čistota. Výrobou CNT se nyní zabývají stovky laboratoří po celém světě a pomalu se dostávají i do sféry komerčního využití. Problémem je však složitost a velmi dlouhá doba přípravy těchto materiálů.

Největší množství CNT je nyní využíváno jako příměs různých druhů kompozitů. Nejčastěji se zde používají pro zvýšení pevnosti, tuhosti a modulu pružnosti, ke zlepšení elektrické a tepelné vodivosti a zvýšení absorpce dopadajícího záření. Pro elektrotechnické aplikace se nejčastěji používají SWCNT, využívají se například jako elektromagnetické stínění a elektrostatická ochrana citlivých elektronických zařízení, nebo pro konstrukci citlivých fotodetektorů. Dále je možné je použít jako polovodičové součástky – diody, tranzistory i LED diody – a jako detektory různých plynů. Jsou také testovány jejich aplikace jako světlovody pro rychlý přenos dat v mikroprocesorech. Díky vysoké tepelné vodivosti se také dají použít jako nanožárovka – jde o zdroj polychromatického záření vysoce prostorově koherentního díky nanorozměrům. Další zajímavou aplikací je jejich použití jako vodiče elektrického proudu skrz dielektrické vrstvy Si mikroelektroniky, mají totiž až o tři řády větší dovolenou proudovou hustotu než Cu nebo Al vodiče. CNT také vynikají obrovským povrchem a vysokou využitelnou kapacitou elektrochemické dvojvrstvy, takže se dají použít jako superkondenzátory s velkou hustotou ukládané energie. V současnosti asi nejzajímavější aplikací je použití SWCNT jako vodivého kanálu polem řízených tranzistorů FET (*Field Effect Transistor*). Uzavřené CNT lze potom podobně jako fulereny použít pro uzamčení a skladování různých jiných druhů molekul [12]. Za opravdu extrémní aplikaci CNT lze potom považovat jejich hypotetické použití jako lano vesmírného výtahu, které by mělo mít délku až 53 000 km a přitom si zachovávat svou pevnost. Velkým problémem je zde však nutná čistota a kvalita trubek a jejich velmi pomalá výroba [3].

Využití CNT v jaderné energetice na sebe jistě nenechá dlouho čekat stejně jako využití v dalších oblastech lidské činnosti. Jak je zřejmé z předchozího textu, budou nanotrubky určité postupně pronikat do veškeré elektroniky, jejich velmi perspektivní použití je v detektorech různých plynů – např. detektory vodíku v kontejnmentu, dále jako čidla různých druhů. Zajímavou variantou je jejich použití pro ukládání radioaktivních odpadů. Nanotrubky uzavřené na obou koncích mohou v sobě vázat a neprodyšně uzamknout velké molekuly štěpných produktů a nepřipustit tak jejich pronikání do životního prostředí. Takové ukládání by bylo sice v současnosti neskutečně drahé, ale do budoucna je možné s ním počítat jako s možnou variantou. Otázkou by zde byla radiační odolnost uhlíkových trubek. Dalším možným použitím a to jak v jaderné energetice, tak v jaderném výzkumu je využití CNT pro vedení neutronů, nebo obecně jakýchkoliv částic. Této problematice se více věnuje kapitola 5.

Nanotrubky se dají také přimíchat do kapalin a vytvořit tak nanokapaliny. Tyto nanokapaliny vynikají vyšší tepelnou kapacitou a lepším odvodem tepla. Přitom nedochází k ulpívání trubek na omývaných površích ani k ucpávání dalších částí výměníků. Poslední možností je jejich nadeponování na povrch teplosměnných ploch, kde jejich použití prokazatelně zvyšuje přestup tepla o přibližně 50% [1]. Otázkou by bylo, jestli by se CNT za provozu takového výměníku tepla ze stěn neuvolňovaly.

4.2 Nanomateriály anorganických sloučenin

Nanomateriály anorganických sloučenin jsou oproti uhlíkovým materiálům jednodušší na výrobu a v průmyslu již našly široké spektrum uplatnění. Jde o nanostruktury všech druhů, základním materiálem bývají nejčastěji různé oxidy, nitridy, karbidy a další. Využívají se zejména jejich katalytické schopnosti, elektrické, magnetické a optické vlastnosti. [12]

4.2.1 TiO_2 nanomateriály

Oxid titaničitý se již hojně využívá v celé řadě aplikací. Nejčastější použití pak nachází ve formě povlaků a barev. Po ozáření vrstvy zářením o dostatečné krátké vlnové délce (např. UV) totiž na jeho povrchu dochází ke vzniku aktivních radikálů, které atakují všechny látky ulpívající na tomto povrchu a rozkládají je. Toho se s úspěchem využívá pro různé antibakteriální a čistící vrstvy a využití je již rozšířeno v komerční sféře.

Dále je možné využít jeho hydrofilních vlastností – po ozáření totiž dochází také ke změně smáčivosti vrstvy oxidu, takže se na povrchu nevytvářejí kapičky vody ale souvislý průhledný vodní film. Tyto vrstvy se využívají pro hydrofilní vrstvy skel, zrcadel a brýlí, které chrání proti kondenzaci kapek a zamlžování.

Neméně zajímavou aplikací je pak jeho použití jako senzory různých plynů. Vrstva totiž vykazuje nejvyšší citlivost na vodík, a tudíž by se dala využít v jaderné energetice pro čidla koncentrace vodíku. V kombinaci s možností úpravy dalších vlastností jako je morfologie a porozita materiálu s možností dopování dalšími prvky, nap. Li, by se dal využít ve vysokokapacitních bateriích pro záložní napájení jaderných elektráren. [12]

4.2.2 Al_2O_3 nanomateriály

Tento keramický materiál známý jako alumina se využívá zejména pro kompozitní konstrukční materiály nebo pro tenké ochranné vrstvy pracovních nástrojů. Vyniká vysokou teplotou tavení, výbornými elektroizolačními vlastnostmi a vysokou tepelnou vodivostí.

Ve formě nanokompozitů, jejichž příprava je velmi jednoduchá, lze využít jejich výborných teplovodivých vlastností. Připravit se dají mletím v kulových mlýnech a následným míšením s nosným materiálem. Další zajímavou aplikací je pak použití nanotekutin s obsahem Al_2O_3 . Tyto tekutiny mají vynikající tepelnou vodivost a velkou tepelnou kapacitu [12]. Dá se jich tedy využít pro zvýšení účinnosti některých tepelných výměníků a možná by se daly použít jako chladiivo jaderných reaktorů. Bylo zjištěno, že použití nanokapaliny na bázi aluminu smíchané s vodou zvyšuje celkový odvod tepla až o 40% při použití částic velikosti 10-50 nm. Přitom do velikosti 100 nm nanočástice nepoškozuji tepelné výměníky [1]. Zde ale velmi záleží na radiačních vlastnostech takové nanokapaliny. Aktivace hliníku neutrony by neměla být příliš vysoká. Navíc vzniklé izotopy jsou velmi krátkodobé, takže hliník zůstane ozářen pouze několik minut [31]. Problémem by mohla být velmi vysoká aktivita primárního okruhu za provozu reaktoru spojená

s vyššími nároky na technologie a zatím neznámé moderační vlastnosti takovéto nanotekutiny. V této oblasti je bezpochyby nutné další podrobné studium.

Vliv svazku neutronů byl otestován na aluminových nanodrátech v rámci této práce při experimentu č. 1, výsledky jsou shrnuty v kapitole 6.4.

4.2.3 Kovové nanomateriály

Vývoj kovových nanomateriálů v řadě případů navazuje na vývoj v oblasti mikrotechnologií. Jedná se především o různé povlaky materiálů, které přechází z tlouštěk v řádu mikrometrů do velikosti nanometrů. Dále se může jednat o další struktury typu nanodrátů, nanoprutů a nanočástic. Nejzajímavějším využitím těchto materiálů se jeví jejich použití pro úpravu teplosměnných povrchů podobně, jako u uhlíkových nanotrubek. Byla otestována celá řada různých možností pokrytí kovových ploch a jejich vliv na rychlost výměny tepla.

Při nadeponování měděných a křemíkových nanodrátů na příslušné povrchy bylo zjištěno, že rychlost přestupu tepla z těchto povrchů se více než zdvojnásobila. Průměr nanodrátů byl v obou případech do 200 nm, délka 40-50 μm . Nanesení nanočástic na tyto povrchy poskytuje podobné výsledky. Zlepšení přestupu tepla se projevuje díky mnohonásobně zvětšenému aktivnímu povrchu, na kterém k přestupu dochází.

Dalším možným využitím by mohla být opět forma nanotekutin pro chlazení primárního okruhu. Bylo zjištěno, že nanokapalina mědi velmi dobře odvádí teplo a (v závislosti na velikosti nanočástic) snižuje multiplikační koeficient, takže způsobuje zastavení štetné reakce. Taková nanotekutina by mohla být použita pro účely havarijního chlazení aktivní zóny např. v případě těžkých havárií.

Také bylo zjištěno, že vytvořením nanostrukturované stěny materiálu lze dosáhnout hydrofobních vlastností takového povrchu a tím na něm zajistit kapkovou kondenzaci. Tato forma kondenzace by velmi zvýšila účinnost kondenzátoru. Přestup tepla v takto upraveném kondenzátoru se může zvýšit až třikrát. Nevýhodou však zatím je velká křehkost takového povrchu a velký vliv stárnutí na jeho kvalitu. [1]

Nanášením mnoha velmi tenkých vrstev různých materiálů na sebe lze také vytvořit podmínky vhodné pro odraz neutronů od takto upravené stěny. Toto je princip výroby neutronových zrcadel, o kterých dále pojednává kapitola 5.1.2. Nejčastěji používané kombinace materiálů jsou Ni-Ti a Fe-Si. [8]

4.3 Zdravotní rizika nanomateriálů

Vzhledem k tomu, že nanotechnologie jsou relativně novým oborem, nejsou ještě zdravotní rizika jednotlivých materiálů zcela známa. Každý materiál dostává v nanorozměrech úplně nové vlastnosti, které se liší nejen dle složení, ale také podle jeho tvaru. Navíc velmi rychle vzniká velké množství nových typů nanomateriálů. Tento proces je potom rychlejší, než může být zkoumání jejich účinků na lidský organismus a životní prostředí. Chybí také jednotná

metodologie a normalizace pro zkoumání vlivů různých nanomateriálů a stále nejsou vyvinuty spolehlivé metody měření jejich koncentrace v životním prostředí.

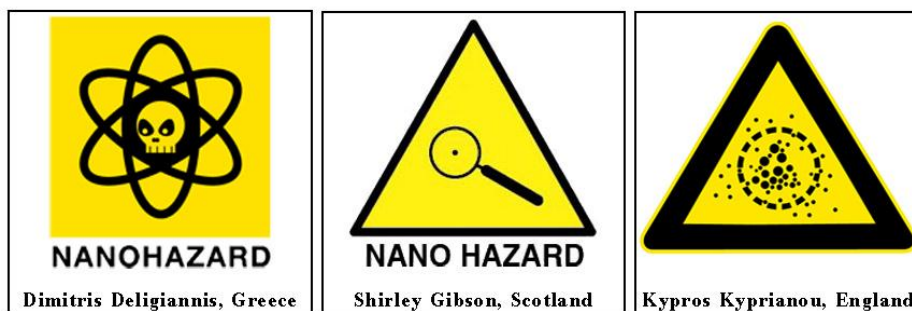
Při hodnocení vlivu nanomateriálů na lidský organismus a obecně životní prostředí je velmi důležité znát následující informace:

- expozice
- dávka
- doba expozice
- příjem
- druh nanomateriálu,

příčemž expozice udává, jestli došlo k proniknutí nanomateriálu do organismu, dávka vyjadřuje koncentraci látky, která do něj vnikla a doba expozice je čas, po který k tomuto stavu docházelo. Příjem pak popisuje cestu, kterou se látka do organismu dostala. Druh materiálu je velmi důležitý, protože každý nanomateriál má na organismus úplně jiný vliv. Toxicita nanomateriálů je dána jejich velkým aktivním povrchem a tudíž zvýšenou reaktivitou oproti makro a mikro materiálům.

Mechanismů působení nanomateriálů na organismus existuje celá řada. Nejdůležitějšími a nejčastějšími jsou však oxidativní stres a genotoxicita. Oxidativní stres vzniká v důsledku narušení rovnováhy mezi oxidativními formami kyslíku a antioxidanty v organismu. V důsledku narušené rovnováhy vznikají volné radikály, které mohou atakovat biologické makromolekuly a mohou narušit strukturu DNA. Genotoxické nanomateriály potom mohou působit na DNA přímo. V obou případech jde o účinky velmi karcinogenní a jejich důsledkem je zvýšené nebezpečí vzniku rakoviny. [9]

Z dosavadních výzkumů vyplývá, že největší vliv na lidský organismus mají nanočástice a nanotrubky. Oba typy materiálů se snadno dostávají do těla přes dýchací soustavu a mohou proniknout z plic do krve a potom do dalších orgánů. V menším množství (záleží na chemickém složení částic) na částice stíhá reagovat imunitní systém a z těla je vyloučit. Zejména uhlíkové nanotrubky jsou v závislosti na průměru a délce velmi podobné vláknům azbestu, takže dráždí plicní sliznici a mohou způsobit rakovinu plic. Navíc v některých případech mohou pronikat až dovnitř do buněk. Jako prokazatelně toxické se pro lidský organismus ukazují nanočástice ZnO, CuO, Ag, C₆₀ a jednostěnné a víceštěnné uhlíkové nanotrubky (SWCNT a MWCNT). Vždy ale záleží na množství, které se do organismu dostane. [21]



Obr. 4-3: Vítězné grafické návrhy značky nano-hazard z World Social Forum v Nairobi

5 UHLÍKOVÉ NANOTRUBKY JAKO PRVEK NEUTRONOVÉ OPTIKY

Jedním z nejperspektivnějších možných využití uhlíkových nanotrubek v jaderném výzkumu a medicíně je jejich použití jako prvku neutronové optiky. Neutronovod sestrojený z CNT by pak byl rozměrově velmi malý a mohl by mít schopnost vést neutrony po zakřivené dráze podobně, jako optická vlákna vedou světlo. Pro bližší pochopení tato kapitola shrnuje současné možnosti neutronové optiky. Také popisuje poznatky z oboru optických vláken a ukazuje jejich možnou aplikaci v oblasti neutronové optiky. Největší využití by takové neutronovody našly bezesporu v medicíně při záchytové neutronové terapii.

5.1 Současné možnosti neutronové optiky

Pro bližší pochopení problematiky a důvodů, proč je nutno se dále zabývat neutronovou optikou, jsou v této podkapitole popsány současné možnosti, které nabízí neutronová optika pro kolimaci neutronového svazku. Způsoby kolimace jsou podobné, jako jsou známy z klasické optiky:

- lom (refrakce),
- odraz (reflexe),
- difrakce,

poslední možností je pasivní kolimace. Ve stručnosti jsou tyto možnosti shrnuty v následujícím textu, kde jsou také uvedeny jejich výhody a nevýhody. Důvodem hledání nových způsobů kolimace je elektrická neutralita neutronů a jejich velmi malá interakce s veškerou hmotou. Tím pádem je velmi obtížné sestavit jakékoliv prvky, které by tok neutronů byly schopny ovlivnit.

5.1.1 Pasivní kolimace

Pasivní kolimace je nejjednodušším způsobem řízení svazku neutronů. V podstatě jde o soustavu stínících ploch, vyrobených nejčastěji z gadolinia nebo kadmia, které zachytávají letící neutrony. V těchto plochách jsou vytvořeny otvory tak, aby na konci bylo dosaženo požadovaného tvaru a směru neutronového svazku, který má na konci velikost a tvar ozařovaného vzorku. Nevýhodou této metody jsou velké ztráty a tím pádem velmi malá hustota neutronového toku na vzorku. Tento způsob kolimace byl využit i při experimentech v další části této práce. [8]

5.1.2 Refraktivní a reflektivní optika

Je zřejmé, že díky vlnové povaze částic mikrosvěta, včetně neutronů, mohou mít za určitých okolností tyto částice podobné vlastnosti jako světlo. Těchto vlastností využívá refraktivní a

reflektivní optika. Podobně jako u světla, je možné i pro neutrony stanovit optický index n daného prostředí jako

$$n = 1 - \frac{\lambda^2}{2\pi} \delta b - \frac{\lambda}{\pi} \rho \sigma_a = 1 - \delta - i\beta, \quad (5.1)$$

kde b je koherentní rozptylová délka, ρ je hustota, σ_a je účinný průřez pro záchyt a λ je vlnová délka. δ je pak reálná část tohoto indexu a β imaginární část, která vyjadřuje absorpci v materiálu. Kvalita daného materiálu potom může být vyjádřena poměrem δ/β . Optické vlastnosti vybraných materiálů shrnuje tabulka Tab. 5-1. Lze z ní vyčíst, že nejlepší optické vlastnosti pro neutrony má uhlík ve formě diamantu a beryllium. I jiné formy uhlíku by však mohly mít podobné vlastnosti, to z něj dělá jeden z nejvhodnějších materiálů pro neutronovou optiku.

Tab. 5-1: Shrnutí optických vlastností vybraných materiálů [8]

Materiál	$\delta (\cdot 10^{-6})$	$\beta (\cdot 10^{-12})$	δ/β	poznámka
Be	150,0	7,31	20,5	silně toxické
C	186,2	4,9	38	diamant
Mg	36,8	21,5	1,7	
Al	33,0	110	0,3	
Si	33,0	68	0,5	
Ni	149,8	3200	0,05	vysoká absorpce
Al ₂ O ₃	90,4	85	1,1	
MgF ₂	80,7	15,2	5,3	

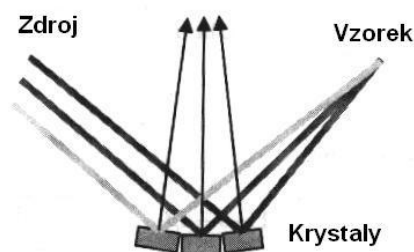
Nespornou výhodou systémů pracujících na principu lomu a odrazu jsou malé ztráty a vysoká hustota neutronového toku na vzorku. Nevýhodou je velmi malý kritický úhel, pod kterým tyto jevy mohou nastat. Stále však jde o lepší řešení než je pasivní kolimace. Refraktivní optika se potom skládá z čoček podobných klasickým optickým prvkům, pouze vyrobených z jiných materiálů. Jednoduchým odebráním a přidáváním jednotlivých čoček lze měnit požadovanou ohniskovou vzdálenost. Nevýhodou je však velmi malý úhel, pod kterým jsou neutrony touto optikou ovlivňovány a tudíž velké ohniskové vzdálenosti. Dalším problémem jsou velké ztráty při použití většího počtu čoček. Nadějným, ovšem velmi drahým, materiálem pro čočky by mohl být diamant.

Reflektivní optika potom pracuje na principu odrazu neutronů od stěn neutronovodu. Zvýšení kritického úhlu, pod kterým mohou neutrony na stěnu neutronovodu dopadat, aby byly ještě odrazeny, se dá zvětšit pomocí tzv. neutronových zrcadel. Princip konstrukce takových zrcadel spočívá v použití velmi velkého počtu tenkých vrstev různých materiálů. Kritický úhel je pak určen tloušťkou nejtenčí vrstvy a použitým materiálem. Pravděpodobnost odrazu roste s druhou mocninou počtu vrstev. Díky nanotechnologiím bylo možno zvýšit počty použitých

vrstev z řádu stovek na tisíce a tím výrazně zvýšit efektivitu neutronovodů na bázi neutronových zrcadel. [8]

5.1.3 Difraktivní optika

Jednou z prvních metod, používaných v neutronové optice, je difrakce na krystalu. Tímto způsobem je možné zmenšit neutronový svazek, zaostřit jej na velikost vzorku a také je takto možné získat monochromatický zdroj neutronů. Příklad takového zařízení je uveden na obrázku Obr. 5-1. Vylepšení difraktivní optiky tkví v použití tzv. elasticky ohnutých krystalů křemíku, které obsahují mnohem méně nečistot a poskytují tedy kvalitnější výsledky při menším ozáření. [8]



Obr. 5-1: Fokussace neutronů pomocí difrakce na krystalu

5.2 Optická vlákna

Optická vlákna jsou velmi populárním, rychlým prostředkem pro přenos informace. Tato informace se v nich transportuje rychlostí světla, což je rychlost dosud žádným jiným prostředkem nepřekonaná. Pro pochopení dalších úvah je nutno definovat některé základní pojmy. Vlnová délka je délka, kterou vlna uběhne během jednoho kmitu

$$\lambda = c \cdot T \quad (5.1)$$

kde c je rychlost světla v daném prostředí a T je časová perioda. Fermatův princip pak říká, že světlo prochází prostředím z jednoho bodu do druhého za minimální dobu. Numerická apertura pak určuje úhel, pod kterým lze do vlákna navázat jednotlivé módy (paprsky)

$$NA = n_a \cdot \sin \varphi_a, \quad (5.2)$$

kde φ_a je úhel pod kterým paprsek vstupuje do vlákna a n_a je index lomu materiálu vlákna. Módy ve vlákne jsou v podstatě energie fotonů, které vlákno buď vede (vedené módy), nebo

vyzařuje (vyzařující módy), nebo které z vlákna tunelují (tunelující módy). Jednotlivé módy jsou pak vlastně stojatým vlněním, které se šíří vláknem – mód určuje rozdělení energie v konečném prostoru. Energii fotonu lze určit jako

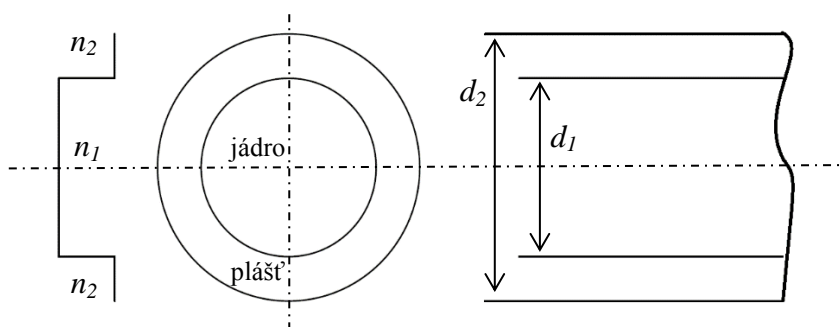
$$E = h \cdot f, \quad (5.3)$$

kde $h = 6,6 \cdot 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ je Planckova konstanta. [20]

Nejjednodušší optická vlákna jsou pak vlákna se skokovou změnou indexu lomu. Tato vlákna jsou jednoduchá na výrobu a poměrně levná. Mohou být jednomódová nebo vícemódová podle toho, jaké energie fotonů jsou schopna vést. Kritický úhel šíření je pak maximální úhel, pod kterým ještě dochází k odrazu fotonu na rozhraní jádro – plášť

$$\cos \varphi_c = \frac{n_2}{n_1}, \quad (5.4)$$

kde n_1 je index lomu materiálu pláště a n_2 je index lomu materiálu jádra. Příklad optického vlákna se skokovou změnou indexu lomu je uveden na obrázku Obr. 5-2. [20]



Obr. 5-2: Optické vlákno a jeho parametry

5.3 Použití CNT pro vedení neutronů

Vedení neutronů v nanovlákněch by mohlo být v podstatě podobné vedení fotonů v optickém vlákně. Pro další úvahy je nutné si shrnout základní vlastnosti neutronu jako elektricky neutrální částice s nenulovou hmotností. Jeho hmotnost dosahuje $m = 1,6749 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$, pohybující se neutron má potom kinetickou energii rovnu

$$E = m \cdot c^2 \cdot \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - 1 \right), \quad (5.5)$$

kde v je jeho rychlost a c je rychlost světla. Tuto energii můžeme též vyjádřit pomocí jeho teploty T vztahem

$$E = k \cdot T. \quad (5.6)$$

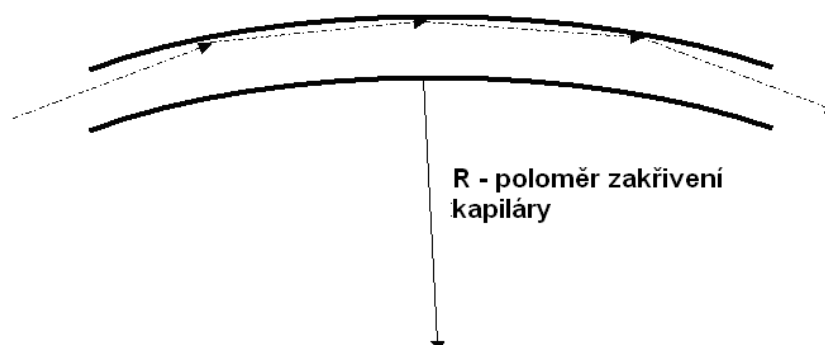
Vzhledem k tomu, že neutron jako částice vykazuje také vlnové vlastnosti, lze stanovit de Broglieho vlnovou délku ze vztahu

$$\lambda = \frac{h}{\sqrt{2 \cdot k \cdot T \cdot m}}. \quad (5.7)$$

kde $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$ J/K je Boltzmannova konstanta. Tepelné neutrony při teplotě 293 K (20 °C) budou tedy mít střední energii $E = 0,0253$ eV, střední rychlost $v = 2210$ m/s a střední vlnovou délku $\lambda = 0,18$ nm [36].

Neutron může s látkou interagovat celou řadou způsobů. Mezi nejčastější interakce patří pružné a nepružné rozptyly rychlých neutronů na jádrech, záchyt pomalých neutronů, štěpení jader a další reakce vedoucí k emisi částic. Lze však určitým způsobem využít také jeho vlnových vlastností. Pokud bude vlnová délka neutronu srovnatelná se vzdáleností atomů v krystalové mřížce nebo s velikostí jiných struktur, nebude neutron interagovat s jediným atomem, ale s celou skupinou atomů. S ohledem na předešlé vztahy lze vyvodit, že interakce se bude týkat spíše tepelných neutronů. Se zvyšující se teplotou neutronů se totiž jejich vlnová délka zkracuje a zmenšuje se také potřebná vzdálenost mezi molekulami.

Pro uvedené tepelné neutrony o teplotě 293 K tedy bude potřeba struktur o velikosti řádově desetin nm. Tento rozměr přibližně odpovídá nejmenším vyprodukovatelným nanotrúbkám. Díky těmto vlastnostem by pak bylo možné vypočítat a vyrobit trubku do oblouku tak, aby v ní byl neutron veden po zakřivené dráze nehledě na jeho elektrickou neutralitu, jak demonstruje obrázek Obr. 5-3.



Obr. 5-3: Vedení neutronu zakřivenou trúbkou [36]

Tento princip se již využívá pro vedení a fokusaci rentgenového záření skleněnými kapilárami o průměru v řádu mikrometrů. Bylo dokázáno, že i pro případ neutronů platí Snellův zákon ve tvaru

$$n = \frac{\cos \varphi}{\cos \varphi'}, \quad (5.8)$$

kde φ je úhel dopadu a φ' je úhel odrazu. Pro neutrony je pak $n < 1$ a pro kritický úhel dopadu lze psát

$$\cos \varphi_c = n \quad (5.9)$$

K odrazu potom bude docházet při dopadu neutronu na stěnu pod úhlem menším, než je úhel kritický. Velikost kritického úhlu závisí na použitém materiálu. Při použití uhlíkových nanotrubek lze díky mnohem menšímu průměru dosáhnout většího zakřivení neutronovodu a tudíž jeho menších rozměrů. [36]

Je zřejmé, že popsané interakce budou fungovat pouze tehdy, bude-li vlnová délka řádově srovnatelná s velikostí struktury, se kterou má interagovat. V případě nanotrubek by tento rozměr měl být průměr trubky. Pokud by byl průměr nanotrubky např. 6 nm, potom bude potřebná energie neutronu podle vzorce 4.4:

$$E = \frac{h^2}{\lambda^2 \cdot 2 \cdot m} = \frac{(6,6 \cdot 10^{-34})^2}{(6 \cdot 10^{-9})^2 \cdot 2 \cdot 1,6749 \cdot 10^{-27}} = 0,081 \text{ meV}, \quad (5.10)$$

což přibližně odpovídá energii chladných neutronů podle tabulky Tab. 5-2.

Tab. 5-2: Rozdělení neutronů podle energií [36]

Označení	Energie
Rychlé neutrony	od 0,1 MeV
Epitermální neutrony	0,4 eV .. 100 keV
Pomalé neutrony	< 0,4 eV
Tepelné neutrony	přibližně 0,025 eV
Chladné neutrony	< 0,025 eV

5.4 Simulace systémů neutronové optiky

Pro návrh a simulace optických systémů pro neutrony byla vyvinuta celá řada různých nástrojů. Jedním z takových nástrojů je program RESTRAX [27] a jeho nastavba SIMRES. Toto simulační prostředí poskytuje realistické modelování prvků neutronové optiky a celých systému pro rozptyl neutronů. Systém vyniká vysokou výpočetní rychlostí díky použitým optimalizačním algoritmu. Program umožňuje nadefinovat zdroj neutronů s rozložením spektra a tvarem, difrakční optiku (různé druhy krystalů) i reflektivní optiku (je třeba znát funkci, která popisuje odraz na povrchu). [8]

Dalším možným simulačním prostředím by mohl být GEANT 4. Jde o velmi obecné prostředí, které umožňuje simulovat fyziku vysokých energií, vesmírné aplikace, medicínské problémy i technologické problémy. Základní funkcí prostředí GEANT je simulace průchodu částic skrz hmotu. Program umožňuje velmi přesně nadefinovat geometrii, sledování, odezvy detektorů, průběh simulace, vizualizaci a uživatelské rozhraní. Prostředí je naprogramováno v C++. Jde o velmi obecný nástroj, který se dá pro každou konkrétní aplikaci rozšířit nadstavbami a dalšími knihovnami. Pro simulace neutronů velkých energií využívá metodu Monte Carlo pro urychlení výpočtů. Pro neutrony nižších energií jsou data načtena z volně dostupných tabulek. [6]

Problémem těchto dvou nejpoužívanějších a obecně všech prostředí pro simulaci neutronů je fakt, že nejsou stále připraveny pro výpočet interakcí při rozměrech v řádech nanometrů. Žádný systém zatím neumožňuje nadefinování atomární struktury látky a také není zcela jasné, jak přesné jsou výpočty pro neutrony velmi malých energií. Pro rozšíření těchto systémů je nejdříve potřeba zjistit přesné vlastnosti různých nanomateriálů a vytvořit odpovídající knihovny, které by prostředí rozšiřovaly. Simulace průchodu neutronů uhlíkovými nanotrubkami proto v současnosti není s dostatečnou přesností možná.

5.5 Záchytová neutronová terapie

Záchytová neutronová terapie (BNCT – Boron neutron capture therapy, NCT) je experimentální forma radioterapie, která využívá záchytu neutronů jádru bóru. Problém jiných radioterapií (např. gama, protonová terapie) spočívá v malé a neselektivní interakci použitých částic / záření s nádorovou tkání. Řešením tohoto problému by mohlo být použití částic alfa, které mají větší kinetickou energii a velmi krátkou dráhu doletu, takže spolehlivě ničí pouze nádorové buňky. Problémem je však, jak dostat částice alfa na místo, kde se nachází jádro. Možným řešením je dopravení bóru ^{10}B do místa nálezu nádoru a jeho ozáření proudem neutronů. Bór má vysoký účinný průřez pro záchyt neutronu. Interakcí neutronu s bórem vzniká jádro lithia ^7Li a částice alfa. Částice alfa pak působí přímo na rakovinné buňky, které spolehlivě zničí. [38]

Stejně jako ostatní druhy hadronových terapií, i nevýhoda BNCT tkví v ozařování zdravé tkáně zároveň s ozařováním tkáně nádorové. Tím vzniká riziko poškození zdravé tkáně a vzniku dalších nádorových onemocnění. Poměr dávky dopravené nádoru a dávky zachycené zdravou tkání potom udává zdravotní riziko této terapie. Navíc kvůli nutnosti použití malých neutronových toků na malou plochu je pacienty nutno ozařovat po poměrně dlouhou dobu (jedno ozařování může trvat i přes půl hodiny). Psychický stav pacientů potom léčbě příliš nenapomáhá.

Pro samotné ozařování se používají neutrony nižších energií ($E < 0,1$ eV), pro které má bór ^{10}B nejvyšší účinný průřez pro zachyt. Ke snížení energií neutronů se využívá celá řada moderátorů, filtrů, kolimátorů a shutterů. Aby se co nejvíce snížil dávkový příkon zdravých tkání, je nutno vyrobit stínící formu s otvorem tvaru nádoru, aby neutrony zasahovaly co nejvíce nádorovou tkáň [13]. Jako jediné prakticky použitelné zdroje neutronů se v současnosti používají jaderné reaktory. Pacient musí být často umístěn velmi blízko reaktoru, protože neexistuje dostatečně účinný způsob vedení neutronů na delší vzdálenosti. V takové blízkosti reaktoru potom dochází k dalšímu nebezpečnému ozaření pacienta, tentokrát hlavně gama zářením.

Právě nutnost použití neutronů nízkých energií nabízí použití uhlíkových nanotrubek pro jejich kolimaci a vedení. Jednou z možností by mohla být fokusace neutronů do jednoho konkrétního malého místa – tím by se podstatně snížila dávka zachycená zdravou tkání a snížilo by se riziko zachytové terapie. Druhou možností by mohla být filtrace neutronů určitých energií. V závislosti na velikosti a vlastnostech použitých nanotrubek by se podobně jako v optických vláknech dalo dosáhnout jednomódového nebo pouze několikamódového neutronovodu, který by vedl pouze neutrony žádaných energií. Ostatní neutrony by mohly být propouštěny do moderátoru nebo úplně mimo oblast působení. Tím by se podstatně zvýšila pravděpodobnost zachytu neutronu bórem přesně v místech, kde je to třeba. Také by se daly použít pro účinné vedení neutronů do větší vzdálenosti od reaktoru nebo po zakřivené dráze a tím omezit dávky obdržené pacientem od záření gama. Je však nutné nejdříve ověřit, zda jsou uhlíkové nanotrubky schopny neutrony vést a za jakých podmínek toho lze dosáhnout.

6 EXPERIMENTÁLNÍ OVĚŘENÍ VLASTNOSTÍ VYBRANÝCH NANOMATERIÁLŮ

Účelem praktické části této práce bylo zjistit, jak vybrané nanomateriály ovlivňují přímý úzký svazek neutronů. Hlavním úkolem bylo zjistit, jestli orientované uhlíkové nanotrubky jsou schopné vést neutrony podobně jako optické vlákno. Pro srovnání výsledků byly otestovány také neorientované uhlíkové nanotrubky, uhlíková nanovláknna a nanodráty z Al_2O_3 . Jako referenční vzorek k uhlíkovým nanomateriálům byl použit blok grafitu.

Před měřením na výzkumném jaderném reaktoru bylo nutno podat žádost o reaktorový čas. Žádost byla schválena a pro navrhované experimenty byly vyčleněny 4 reaktorové směny, včetně technické pomoci personálu a možnosti měření v laboratořích neutronové fyziky a gama spektrometrie a aktivační analýzy. Měření na výzkumném jaderném reaktoru bylo podpořeno v rámci režimu Open Access projektu Velké infrastruktury pro výzkum a vývoj a inovace číslo LM2011031. Fotodokumentace průběhu měření je v příloze H.

6.1 Použité materiály a vzorky

6.1.1 Neorientované MWCNT

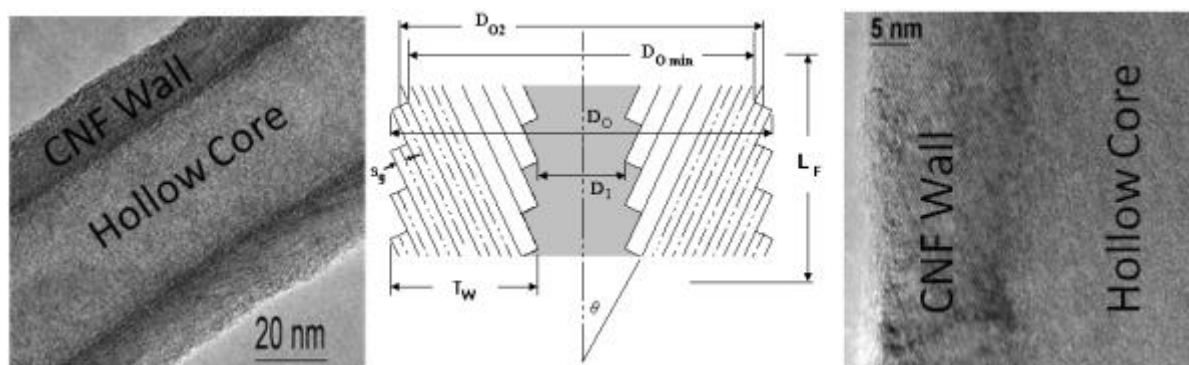
Neorientované víceštěnné uhlíkové nanotrubky (MWCNT) byly použity jako referenční materiál pro srovnání s nanotrubkami orientovanými. Byly nakoupeny ve formě prášku připomínajícího strukturou popel. Aby se tvarem co nejvíce přiblížily grafitovému bloku, byly nasypány do hranaté lahvičky z PVC (polyvinylchlorid) o rozměrech 37 x 37 x 37 mm (šířka, hloubka, výška – výška udává výšku samotného obsahu, ne prázdné lahvičky), přičemž nejdůležitějším rozměrem je hloubka, protože tímto směrem prochází svazek neutronů. Fotografie vzorku je na obrázku Obr. 6-1. Nanotrubky byly dodány firmou Sigma-Aldrich (Německo). Jejich čistota je >95 %, vnější průměr 6-9 nm, délka 5 μm , hustota 2100 kg/m^3 při 25 $^\circ\text{C}$ a hustota prášku je 220 kg/m^3 . Jednotlivé nanotrubky nebyly rovné, ale měly různě zakřivený tvar a různou délku, jak je vidět na snímcích z mikroskopu atomových sil (AFM) v příloze G.



Obr. 6-1: Neorientované MWCNT připravené pro měření

6.1.2 Uhlíková nanovláčna

Uhlíková nanovláčna byla taktéž zakoupena u firmy Sigma-Aldrich. Svou formou jsou na první pohled nerozlišitelné od nanotrubelek, jsou dodávány také ve formě prášku. Pouze při přesypávání je vidět nepatrný rozdíl, každý materiál je trochu jinak sypký. Pro srovnání s předcházejícím vzorkem byla nanovláčna nasypána do lahvičky také o velikosti 37 x 37 x 45 mm, pouze materiál lahvičky byl tentokrát HDPE (High Density Polyethylen – polyetylen vysoké hustoty). Polyetylen má sice moderační vlastnosti pro neutrony, ale v takto malé tloušťce by neměl ovlivnit výsledky měření. Čistota nanovláken je >99,9 %, jejich vnější průměr D_0 je 100 nm, délka 20 – 200 μm , hustota 1900 kg/m^3 a hustota prášku je 56,1 kg/m^3 . Nanovláčna nejsou v celém svém průměru plná. V jejich středu se nachází dutina, která vytváří trubici podobně jako u CNT, mají však podstatně tlustší stěnu a jejich stavba je jiná. Náhled na vnitřní strukturu nanovláken poskytuje obrázek Obr. 6-2. Vnitřní průměr D_1 nanovláčna je přibližně 50 – 70 nm.



Obr. 6-2: Vnitřní struktura uhlíkových nanovláken [29]

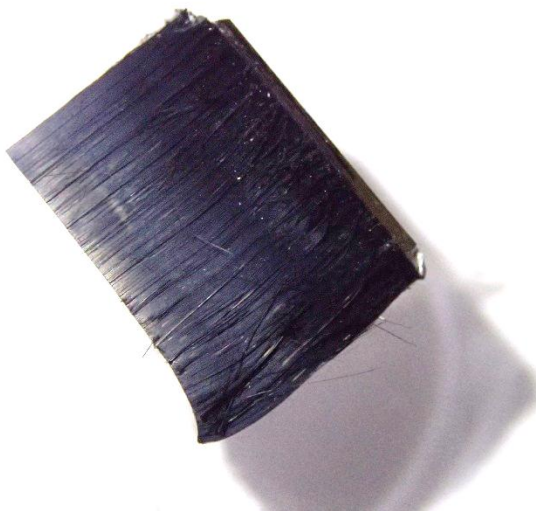
6.1.3 Nanodráty z Al_2O_3

Nanodráty z Al_2O_3 byly zakoupeny také od firmy Sigma-Aldrich, pouze pro srovnání s ostatními materiály a otestování jejich reakce na svazek neutronů. Byly dodány také ve formě prášku, tentokrát bílé barvy. Přesypány byly opět do lahvičky z HDPE, tentokrát o rozměrech 32 x 32 x 20 mm. Průměr nanodrátů je 2-6 nm, délka 200-400 nm.

6.1.4 Orientované MWCNT

Orientované uhlíkové nanotrubičky byly nejdůležitějším vzorkem, použitým pro experiment. Byly zakoupeny u společnosti CVD Materials Corporation (USA). Vzorek má podobu černého bloku o rozměrech základny 10 x 10 mm. Nanotrubičky jsou nadeponovány na křemíkový wafer (SiO_2) o tloušťce přibližně 0,5 mm a jejich délka je 7 – 10 mm. Jsou to nejdelší orientované nanotrubičky, které se dají na trhu zakoupit. Fotografie tohoto vzorku je na obrázku Obr. 6-3. Je na ní vidět orientace nanotrubelek a křemíkový wafer, na kterém jsou nadeponovány. Také je vidět, že v dolní části jsou nanotrubičky mírně zakřivené jako důsledek výrobního procesu. Toto zakřivení

by však na výsledky měření nemělo mít vliv, protože bude mimo dosah neutronového svazku, který bude užší a bude směřovat do středu vzorku. Vzorek bude k držáku připevněn oboustrannou lepicí páskou, protože upevnění přitažením šroubů by jej mohlo poškodit.



Obr. 6-3: Orientované MWCNT použité pro měření

6.1.5 Grafit

Grafitový blok bude použit pro srovnání vlastností uhlíkových materiálů s různým uspořádáním molekul. Pro měření byly použity dva bloky univerzálního grafitu R8500 o hustotě 1770 kg/m^3 . Rozměry menšího bloku jsou $29 \times 35 \times 72 \text{ mm}$ (hloubka koresponduje s hloubkou lahvičky s nanotrúbkami), rozměry většího bloku jsou $155 \times 117 \times 175 \text{ mm}$.

6.1.6 Olovo

Pro porovnání byly v kanálu použity také olověné cihly, běžně používané pro stínění γ -záření. Velikost cihel byla $102 \times 51 \times 102 \text{ mm}$. Byly použity dva kusy těchto cihel položených na sebe těsně před detektory.

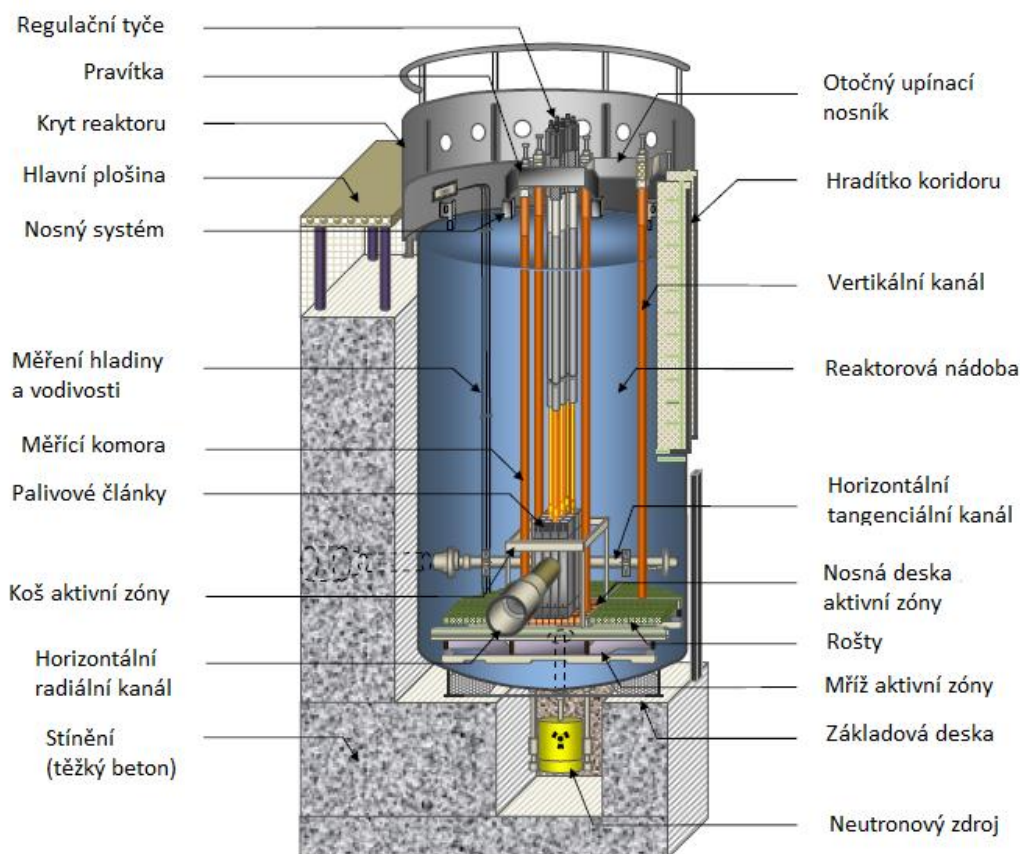
6.1.7 Další použité materiály

Mezi další materiály, použité v měřicím boxu patří kadmium, které je vhodné pro stínění neutronů, dále Neutrostop (polyetylen dopovaný bórem) se stejným účelem. Držák vzorků byl zhotoven z běžné oceli natřené barvou na železo, podstava a držák detektorů ze dřeva. Dřevo díky vysokému obsahu vody částečně moderuje neutrony, ale výsledky měření neovlivní, protože stolek je postaven mimo neutronový svazek a držák detektorů je vyroben rovnoměrně. Na podstavu celého zařízení byl použit ocelový plech a na podstavu stolku hliníkový profil. Hliník se při zachytu neutronů sice aktivuje, ale výsledné produkty mají velice krátký poločas rozpadu.

6.2 Měřicí přístroje a zařízení

6.2.1 Reaktor VR-1

Školní reaktor VR-1 „Vrabc“ je lehkovodní reaktor bazénového typu. Jako moderátor se používá lehká voda, palivem je obohacený uran s obsahem 19,7% ^{235}U . Palivové tyče jsou čtvercové, typ IRT-4M. Díky velmi malému výkonu reaktoru nedochází k měřitelnému vyhoření paliva, a tudíž nemůže dojít k významnému úniku radioaktivních látek – štěpných produktů do okolí. Samotná nádoba reaktoru je tvořena dvěma bazény, jeden bazén je určen pro aktivní zónu, druhý je manipulační. Jejich průměr je 2 300 mm a výška 4 720 mm. Biologické stínění je provedeno demineralizovanou vodou a těžkým betonem. Chlazení aktivní zóny probíhá pouze přirozenou konvekcí, jmenovitý tepelný výkon reaktoru je 1 kW, krátkodobě 5 kW.



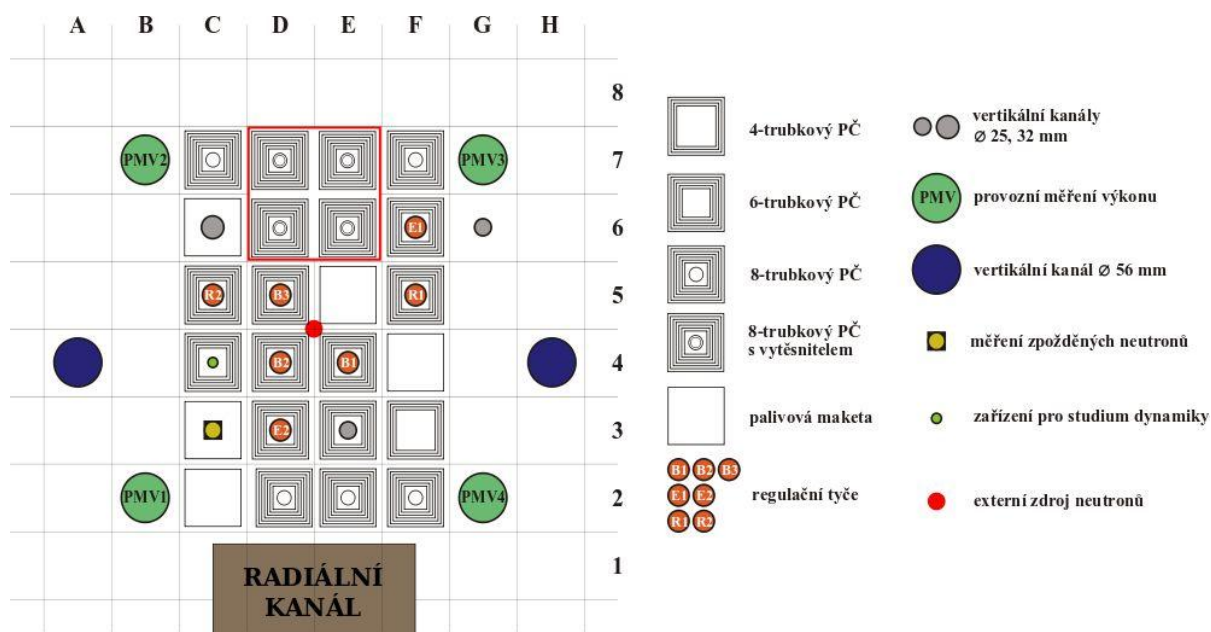
Obr. 6-4: Schéma reaktoru VR-1 [33]

Hustota neutronového toku závisí na typu prováděného experimentu, průměrně se pohybuje okolo $2 \cdot 10^9 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ pro tepelné a $1 \cdot 10^9 \text{ n.cm}^{-2} \cdot \text{s}^{-1}$ pro rychlé neutrony v centru aktivní zóny. Nejvýznamnější experimentální zařízení jsou [17]:

- Radiální horizontální kanál o průměru 200 mm,
- tangenciální horizontální kanál o průměru 100 mm,
- vertikální kanály různých průměrů (56, 32, 25 a 12 mm),

- beryliové a grafitové bloky,
- potrubní pošta pro ozařování malých vzorků,
- zařízení pro detekci zpožděných neutronů,
- zařízení pro studium dutinového koeficientu reaktivity,
- zařízení pro studium dynamiky reaktoru,
- zařízení pro měření aktivity vzorků ve tvaru drátu,
- TLD zařízení pro studium gama polí.

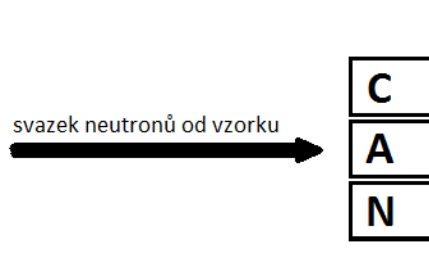
Schéma školního reaktoru VR-1 je na obrázku Obr. 6-4. Je na něm vidět umístění experimentálních kanálů – jak vertikálního, tak horizontálního tangenciálního a radiálního. Právě horizontální radiální kanál (HRK) byl použit pro prováděné experimenty. Jeho schéma s rozměry je uvedeno v příloze A. Schéma rozložení aktivní zóny reaktoru použité při experimentech je na obrázku Obr. 6-5.



Obr. 6-5: Schéma aktivní zóny reaktoru při prováděných experimentech

6.2.2 Detektory neutronů s ^3He

Pro měření byly použity tři plynem plněné aktivní detektory neutronů s ^3He DeXtray 0,5NH1/1KF válcového tvaru. Sériová čísla použitých detektorů jsou ADY0101 (detektor N), ADY0102 (detektor A) a 14763-B0110 (detektor C). Průměr aktivního objemu detektorů je 10 mm, délka také 10 mm. Detektor C měl nastaven jiný offset. Toto nastavení nebylo možno pro měření změnit, takže bylo možno monitorovat pouze změny na jednotlivých detektorech, nedaly se porovnávat signály detektorů mezi sebou. Navíc signál z detektoru C byl přibližně o polovinu menší, než s ostatních dvou, takže měření je zatíženo větší chybou. Více o přímé detekci plynem plněnými detektory je napsáno v kapitole 6.3.1. Rozestavení detektorů při měření je naznačeno na obrázku Obr. 6-6.



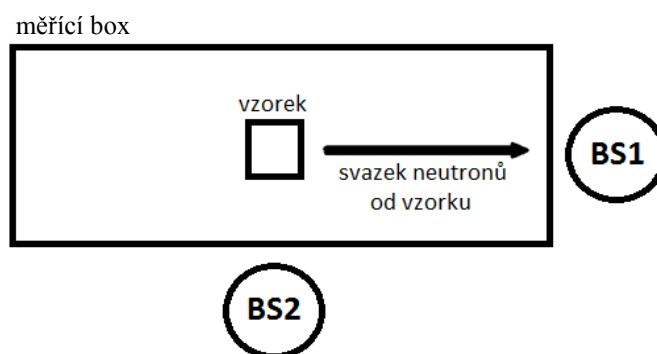
Obr. 6-6: Rozmístění detektorů v držáku (pohled shora)

6.2.3 Tříkanálové amplitudové analyzátory

Tříkanálové amplitudové analyzátory byly použity pro převod signálu z ^3He detektorů neutronů. Jedná se o přístroje TEMA EMK310, sériová čísla 6295 (detektor N), 6296 (detektor A) a 6293 (detektor C). Výstupy z jednotlivých kanálů dávaly různě silný signál v závislosti na ovlivnění dalším zářením. Pro interpretaci výsledků byl použit pouze třetí kanál, který má nejvíce odfiltrován signál od γ -záření a tudíž nejpřesnější výsledky pro neutrony.

6.2.4 Měřič dávkového ekvivalentu neutronů s Bonnerovou sférou

Měřič dávkového ekvivalentu neutronů s Bonnerovou sférou je kombinací detektoru neutronů a převodníku pro přímé zobrazení dávkového ekvivalentu detekovaných neutronů. Bonnerova sféra, vyrobená z polyetylenu zajišťuje zpomalení neutronů pro lepší detekci. Použit byl systém TEMA JKA300 (sériové číslo 84-021) s průměrem Bonnerovy sféry 250 mm. Tímto detektorem se měřil příkon dávkového ekvivalentu neutronů za kanálem nebo vedle měřícího boxu blízko vzorku, jak je naznačeno na obrázku Obr. 6-7.



Obr. 6-7: Schéma umístění měřiče dávkového příkonu s Bonnerovou sférou (pohled shora)

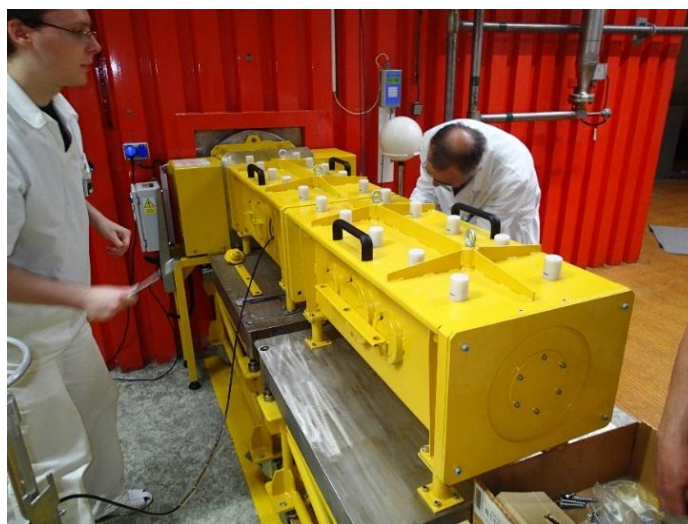
6.2.5 Aktivační detektory neutronů

Pro neutronovou aktivační analýzu byly použity aktivační detektory neutronů. Jde o fólie vyrobené z přírodního india (4,3% ^{113}In , 95,7% ^{115}In [2]) s velmi malým podílem nečistot. Fólie byly kruhové o průměru 12,7 mm (1/2 ") a 12 mm. Byly umístěny v mřížce 3 x 3, aby bylo možno zjišťovat odezvu ve všech směrech.

Aktivované fólie pak byly měřeny polovodičovým HPGe (High-purity Germanium – germanium o vysoké čistotě) detektorem γ -záření Canberra GC2518 FWHM. Tento detektor má rozsah měřitelných energií záření 40 keV až 10 MeV. Detektor byl chlazen tekutým dusíkem pro zajištění dlouhodobé stability. Pro uložení a analýzu spektra γ -záření byl použit originální software od firmy Canberra. Pomocí něj bylo možno přímo odečíst velikosti a energie jednotlivých vrcholů spektra.

6.2.6 Měřicí box s shutterem

Měřicího boxu s shutterem bylo využito pro urychlení měření a usnadnění manipulace se vzorky mezi jednotlivými fázemi měření. Měřicí box byl přistaven a napojen přímo na horizontální radiální kanál, od kterého byl oddělen uzavíratelným elektricky ovladatelným shutterem. Shutter umožňoval během asi 40 sekund uzavřít HRK a odstínit neutrony vycházející z reaktoru. Tím se umožnila snadná a rychlá změna nastavení nebo výměna vzorků. Fotografie boxu s shutterem je na obrázku Obr. 6-8.

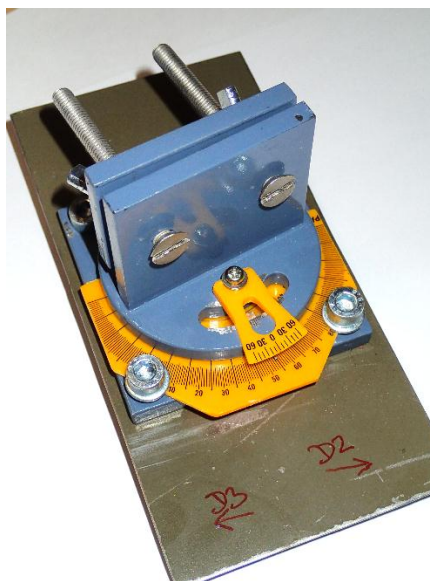


Obr. 6-8: Měřicí box s shutterem připevněným na HRK

Celý box byl rozdělen do dvou částí napojených na sebe. Použita byla pouze první část o délce vnitřního prostoru 390 mm. Šířka a výška vnitřku boxu byly 248 mm. Druhá část sloužila pouze jako stínění neutronů. Nemohla být využita pro samotné měření, protože hustota neutronového toku v ní byla již příliš malá a chyba měření by byla tudíž příliš velká. Schéma připojení měřicího boxu k horizontálnímu radiálnímu kanálu reaktoru je v příloze C.

6.2.7 Držák vzorků

Držák vzorků byl navržen tak, aby se na něj daly upevnit pevné vzorky různých velikostí (zejména grafit a orientované nanotrubky) a aby se dal za provozu přesně natáčet po jednotlivých stupních. Návrh držáku je uveden v příloze A. Držák byl dodatečně oproti výkresu vybaven stupnicí a střílkou pro možnost přesného odečtu úhlu. Kompletní držák je vidět na obrázku Obr. 6-9.

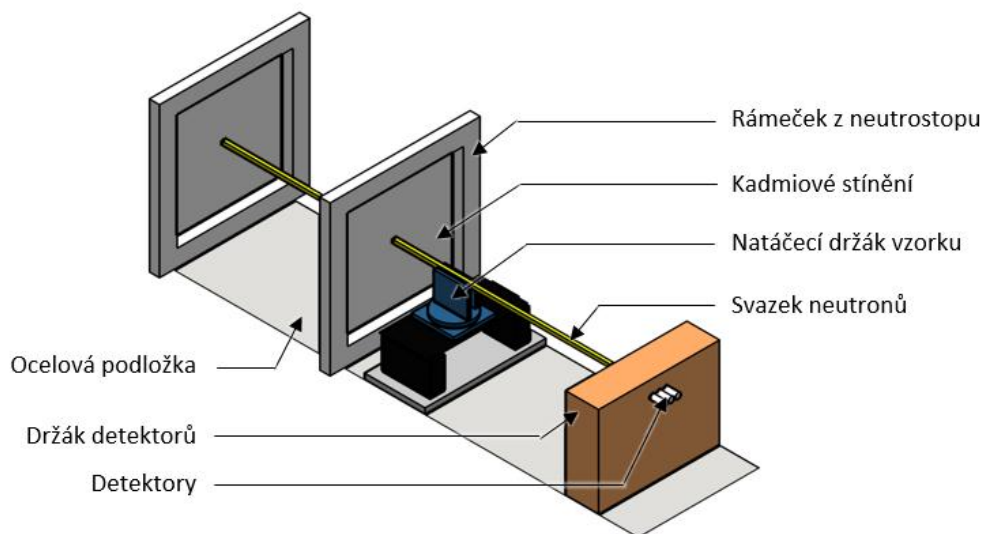


Obr. 6-9: Fotografie držáku vzorků s úhломěrem

6.2.8 Experimentální zařízení

Pro zajištění co největší přesnosti měření bylo nutno vyrobit experimentální zařízení, které svou velikostí přesně korespondovalo s měřicím boxem. Byla zhotovena plechová podložka, na kterou byly zakresleny souřadnice jednotlivých komponent, jejichž umístění se mohlo dle potřeby pozměnit. Kolimace neutronů do přímého úzkého svazku byla zajištěna dvěma kadmiovými plechy se čtvercovým otvorem o velikosti 6 x 6 mm v jejich středu. Plechy byly dále upevněny na rámečky z neutrostopu (polyetylen dopovaný bórem) o vnějších rozměrech 248 x 248 mm. Ty byly přesně zasazeny do měřicího boxu a podle nich se srovnaly ostatní komponenty.

Po vložení zařízení do boxu bylo nutno jej ještě přesně dorovnat a kalibrovat pomocí hliníkového kruhového profilu průměru 6 mm. Ten simuloval průchod neutronů zařízením a pomocí něj bylo ověřeno, že celé zařízení je dokonale rovné. Zjednodušené schéma experimentálního zařízení s popisem je na obrázku Obr. 6-10. Podrobné schéma se zakreslenými vzdálenostmi jednotlivých prvků je v příloze B.



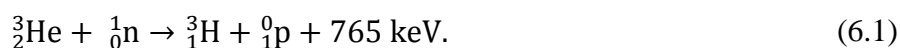
Obr. 6-10: Schéma experimentálního zařízení, vkládaného do měřicího boxu

6.3 Použité metody měření

Pro účely experimentu bylo nutno měřit velikost neutronového toku a jeho změnu se změnou orientace vzorku nebo se záměnou vzorku. Pro měření byly zvoleny dvě metody – přímá detekce neutronového toku pomocí ^3He detektorů a aktivační analýza. Pomocí přímé detekce byly získány okamžité údaje o neutronovém toku na jednotlivých detektorech a základě těchto výsledků měla být hypotéza potvrzena pomocí přesnější aktivační analýzy indiových fólií.

6.3.1 Přímá detekce neutronového toku ^3He detektory

Plynem plněné detektory neutronového toku s ^3He fungují na principu ionizace plynu v ionizační komoře prolétající částicí. Ionizační komora se potom chová jako kondenzátor, ve kterém nabitě částice plynu putují buď na katodu, nebo anodu detektoru. Tam vznikne elektrický impuls, který se dále zpracovává a vyhodnocuje. Počet pulsů potom odpovídá počtu částic, které detektor zaznamenal. Protože interakce neutronů s látkou je všeobecně velmi malá, využívají detektory neutronů sekundárních ionizačních reakcí. V héliem plněných detektorech se využívá následující reakce:



Přestože je citlivost detektorů na γ -záření malá, je nutno tento signál odfiltrovat. To se provádí pomocí amplitudové diskriminace signálu. Veškeré zpracování probíhá v tříkanálovém pulsním analyzátoru EMK310. [18]

6.3.2 Neutronová aktivační analýza

Neutronová aktivační analýza je velmi přesná nedestruktivní metoda určování obsahu látek v daném vzorku. Neutrony se vzorkem interagují nejčastěji třemi způsoby – pružným rozptylem, nepružným rozptylem nebo záchytem. V případě nepružného rozptylu dochází k excitaci jádra atomu, které přechází do vyššího energetického stavu. V případě záchytové reakce je neutron jádrem absorbován, vzniká nový nuklid s vyšší atomovou hmotností a jeho jádro se excituje. Přebytkové energie se pak může zbavit emisí kvanta γ -záření nebo jadernou reakcí vedoucí k emisi částic. Měřením energie γ -záření lze potom určit, který nuklid toto kvantum vyzářil. Podle citlivosti na různé energie neutronů lze aktivační detektory rozdělit na:

1. detektory tepelných neutronů (do 0,5 eV) – např. ^{115}In , ^{55}Mn ,
2. rezonanční detektory (0,5 eV ÷ 0,1 MeV) – např. ^{65}Cu , ^{23}Na ,
3. prahové detektory rychlých neutronů (nad 0,1 MeV) – např. ^{234}U , ^{238}U , ^{237}Np .

Pro měření experimentu s nanomateriály byl použit indiový detektor, protože při daných rozměrech by měla být nejvýraznější změna v oblasti právě tepelných neutronů [33]. Dále je indium vyhovující pro nízké hustoty neutronového toku.

Pro správné určení energie a intenzity detekovaných fotonů γ je třeba nejdříve provést energetickou a účinnostní kalibraci detektoru. Energetická kalibrace se většinou provádí pomocí dodaného softwaru, při účinnostní kalibraci se nastavuje detekční účinnost spektrometru pro jednotlivé energie fotonů γ . Po získání energetického spektra daného vzorku je nutno pro správné určení reakční rychlosti zavést celou řadu opravných faktorů. Jejich použití při výpočtu reakční rychlosti R_R ukazuje následující vzorec:

$$R_R = S(E_\gamma) \cdot \frac{1}{N_0} \cdot \frac{1}{t_{live}} \cdot \frac{1}{1 - e^{-\lambda t_a}} \cdot \frac{1}{e^{-\lambda t_v}} \cdot \frac{\lambda t_{real}}{1 - e^{-\lambda t_{real}}} \cdot \frac{1}{I_\gamma(E_\gamma)} \cdot \frac{1}{\varepsilon_{FEP}^\gamma(E_\gamma)} \quad [\text{s}^{-1}], \quad (6.2)$$

kde

$S(E_\gamma)$ je plocha změřeného vrcholu spektra,

N_0 je počet částic látky,

$\frac{1}{t_{live}}$ je oprava na čistou dobu měření,

$\frac{1}{1 - e^{-\lambda t_a}}$ je oprava na rozpad izotopu během aktivace,

$\frac{1}{e^{-\lambda t_v}}$ je oprava na rozpad izotopu po dobu vymírání,

$\frac{\lambda t_{real}}{1 - e^{-\lambda t_{real}}}$ je oprava na rozpad izotopu během měření,

$\frac{1}{I_\gamma(E_\gamma)}$ je oprava na intenzitu γ přechodu,

$\frac{1}{\varepsilon_{FEP}^\gamma(E_\gamma)}$ je oprava na efektivitu detektoru pro danou geometrii,

λ je rozpadová konstanta,

E_γ je energie daného kvanta fotonů γ ,

t_{live} je čistá doba měření po odečtení mrtvé doby detektoru,

t_a je doba měření na spektrometru,

t_v je doba vymírání (doba mezi koncem ozařování a začátkem měření),

t_{real} je skutečná doba měření aktivity detektorem.

Efektivita detektoru pro určitou energii a pro konkrétní geometrii se určí dle vztahu

$$\varepsilon_{FEP}^\gamma(E_\gamma) = \exp[a_0 + a_1 \cdot \ln(E_\gamma) + a_2 \cdot \ln^2(E_\gamma) + a_3 \cdot \ln^3(E_\gamma) + a_4 \cdot \ln^4(E_\gamma) + a_5 \cdot \ln^5(E_\gamma) + a_6 \cdot \ln^6(E_\gamma)], \quad (6.3)$$

kde a_0, a_1, \dots, a_6 jsou koeficienty pro danou geometrii, E_γ je energie kvanta gama [MeV]. Hodnoty těchto koeficientů pro použitou geometrii jsou uvedeny v příloze D. [33]

Po provedení všech korekcí je možné z reakční doby vypočítat počet vyprodukovaných jader na jednotku hmotnosti detektoru za jednotku času, což v podstatě odpovídá počtu neutronů, které aktivační detektor zachytil za jednotku času během ozařování

$$N(E_\gamma) = R_R \cdot \frac{N_0}{m} \quad [\text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}], \quad (6.4)$$

kde m je hmotnost aktivačního detektoru (fólie) [33]. Nedílnou součástí interpretace výsledků je také určení nejistoty měření pro daný vrchol spektra. Ta se určí podle vztahu

$$\varepsilon_{err}(E_\gamma) = \sqrt{\left(\frac{\varepsilon_{iz}}{k_{iz}}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{ef}}{\varepsilon_{FEP}^\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_s}{S(E_\gamma)}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_I}{I_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_E}{E_\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_m}{m_v}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{ta}}{t_a}\right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_{T1/2}}{T_{1/2}}\right)^2}, \quad (6.5)$$

kde

k_{iz} je procentní obsah aktivovaného izotopu v detektoru,

I_γ je intenzita příslušné energie fotonu γ ,

m_v je hmotnost detektoru,

$T_{1/2}$ je poločas přeměny,

ε je vždy nejistota určení příslušné veličiny.

Celková nejistota měření se potom určí pomocí směrodatné odchylky

$$\varepsilon_{err} = \sqrt{\frac{\sum (\varepsilon_{err}(E_\gamma))^2}{n-1}}, \quad (6.6)$$

kde n je počet chyb zahrnutých do vzorce.

6.4 Experiment 1 – ovlivnění toku neutronů různými materiály

Cílem prvního experimentu bylo prověřit, jak různé materiály ovlivňují neutrony. K měření byly použity přímé detektory umístěné za vzorkem. Proměřen byl vliv celkem čtyř materiálů:

- neorientované uhlíkové nanotrubičky,
- uhlíková nanovlákna,
- nanodráty z Al_2O_3 ,
- grafit,

přičemž grafit byl proměřen ve dvou různých velikostech (viz kapitola 6.1). Měření bylo z časových důvodů rozděleno do dvou fází. Po celou dobu obou měření byl udržován konstantní výkon reaktoru 2E6 ($2 \cdot 10^6$ impulzů na detekčním systému), což odpovídá tepelnému výkonu přibližně 20 W [32]. Polohy řídicích tyčí byly následující:

- měření 1: R1=466,25; R2=550; E1=311; E2=681,
- měření 2: R1=462; R2=550; E1=311; E2=681.

Postup byl při obou měřeních stejný a sice:

1. nachystání prázdného experimentálního zařízení pro proměření referenčních hodnot,
2. otevření shutteru,
3. měření odezvy na všech třech detektorech po dobu 4 minut,
4. zavření shutteru,
5. umístění vzorku do držáku,
6. opakování bodu 2 – 5 pro všechny vzorky.

Rozmístění detektorů je naznačeno v kapitole 6.2.

6.4.1 Naměřená data

Celý soubor dat naměřených detektory se nachází na CD, data z prvního měření jsou v souboru *2013-04-18-detektor-X.csv*, kde X je značka příslušného detektoru, data z druhého měření potom v souboru *2013-04-19-detektor-X-02.csv*. Z naměřených dat byly vynechány

hodnoty, které byly narušeny pouze rušením přístrojů a byly zpracovány stejně dlouhé časové intervaly. Z tohoto souboru dat byl vypočten aritmetický průměr odezvy detektoru \bar{n} , relativní změna oproti referenční hodnotě (zařízení bez vzorku) $\Delta\bar{n}$, směrodatná odchylka s a pro porovnání dat mezi různě nastavenými detektory variační koeficient v . Zaznamenán byl také příkon dávkového ekvivalentu neutronů na pozicích BS1 a BS2. Výsledky prvního měření shrnuje tabulka Tab. 6-1.

Tab. 6-1: Shrnutí výsledků měření č. 1 vlastností různých materiálů

	detektor	vzorek			
		žádný	CNT neorientované	grafit malý	grafit velký
\bar{n} [n · s ⁻¹]	C	17,29	15,48	13,13	4,92
	A	61,80	53,60	38,99	14,60
	N	75,87	69,99	60,81	21,63
$\Delta\bar{n}$ [%]	C		-10,5	-24,0	-71,6
	A		-13,3	-36,9	-76,4
	N		-7,8	-19,9	-71,5
s [n · s ⁻¹]	C	4,00	3,91	3,47	2,08
	A	7,70	6,72	6,48	3,72
	N	8,98	8,17	8,69	4,69
v [%]	C	23,2	25,3	26,4	42,3
	A	12,5	12,5	16,6	25,4
	N	11,8	11,7	14,3	21,7
H [μSv · s ⁻¹]	BS1	106	133	126	36
	BS2		35		50

Výběrová směrodatná odchylka byla vypočtena podle vztahu

$$s = \sqrt{\frac{\sum(n - \bar{n})^2}{(N - 1)}}, \quad (6.7)$$

kde n je změřená odezva detektoru a N je počet naměřených hodnot. Variační koeficient byl potom vypočten podle vztahu

$$v = \frac{s}{\bar{n}}. \quad (6.8)$$

Výsledky druhého měření jsou shrnuty v tabulce Tab. 6-2. Měření s neorientovanými CNT nebylo z časových důvodů podruhé provedeno, proto byly použity výsledky z prvního měření. Dávkový příkon v polohách BS1 a BS2 nebyl proměřen pro všechny případy. Dá se z něj však v některých případech odhadnout míra rozptylu neutronů na vzorku, proto je zde uvedeno.

Tab. 6-2: Shrnutí výsledků měření č. 2 vlastností různých materiálů

	detektor	vzorek			
		žádný	CNT neorientované	nanovlákná	nanodráty
\bar{n} [n · s ⁻¹]	C	17,78	15,48	15,18	14,27
	A	65,75	53,60	49,65	43,39
	N	76,63	69,99	63,48	56,95
$\Delta\bar{n}$ [%]	C	/	-10,5	-14,6	-19,7
	A	/	-13,3	-24,5	-34,0
	N	/	-7,8	-17,2	-25,7
s [n · s ⁻¹]	C	4,20	3,91	3,87	3,68
	A	7,87	6,72	6,86	6,34
	N	8,79	8,17	7,72	7,33
v [%]	C	23,6	25,3	25,5	25,8
	A	12,0	12,5	13,8	14,6
	N	11,5	11,7	12,2	12,9
H [μSv · s ⁻¹]	BS1	/	133	130	130
	BS2	/	35	/	/

6.4.2 Zhodnocení experimentu

Výsledky tohoto měření potvrzují předpoklad, že s rostoucí hustotou uhlíkového materiálu roste také míra rozptylu neutronů, které jím procházejí neohledně na jeho strukturu. Rozptyl potvrzuje také měření detektorem s Bonnerovou sférou, kdy u grafitu značně narůstá příkon dávkového ekvivalentu od neutronů na boční straně boxu, těsně vedle vzorku. Předpokládanému průběhu se však vymyká výsledek na orientovaných MWCNT. Na tomto vzorku je vidět, že rozptyl, navzdory jejich vyšší hustotě, je relativně nižší. Výsledky vzorků uhlíkových materiálů jsou přehledně shrnuty v tabulce Tab. 6-3, kde jsou seřazeny podle hustoty vzorku. Pro srovnání byl vybrán pouze detektor A, protože na něm byl nejsilnější signál. Srovnány jsou pouze vzorky stejných rozměrů.

Získaná data naznačují, že uhlíkové nanotrúbky rozptylují neutrony méně, než by teoreticky měly. To může být způsobeno faktem, že neutrony mají snahu trúbkou prolétat, pokud je její natočení ve směru jejich letu, a neinteragují s její stěnou. Přestože se ve středu nanovláken vyskytuje také dutina podobně jako u CNT, tento efekt u nich nenastává (dutina nemá strukturu trúbky, jak je vidět na obrázku Obr. 6-2). Tento efekt potvrzuje i výsledek experimentu č. 2.

Tab. 6-3: Shrnutí výsledků experimentu 1

Vzorek	Hustota materiálu [kg · m ⁻³]	Hustota vzorku [kg · m ⁻³]	$\Delta\bar{n}$ (detektor A) [%]
Nanovlákná	1900	56,1	-24,5
Neorientované CNT	2100	220	-13,3
Grafit	1770	1770	-36,9

6.5 Experiment 2 – ovlivnění toku neutronů orientovanými uhlíkovými nanotrúbkami

Hlavním úkolem druhého experimentu bylo zjistit, zda a jak ovlivní úhel natočení orientovaných MWCNT svazek neutronů, zejména jestli jsou nanotrúbky schopny při určitém úhlu neutrony vést. Byly proměřeny údaje pro úhel natočení od -4° po 4° po jednom stupni. Dále byly změřeny také toky při -1,5°, -0,5°, 0,5° a 1,5°. Měření po polovinách stupňů však bylo provedeno dodatečně a neposkytlo údaje srovnatelné s ostatními měřeními, proto jsou data ve výsledcích záměrně vynechána. Postup měření při tomto experimentu byl následující:

1. natočení vzorku do základní polohy (0°),
2. otevření shutteru a proměření odezvy detektorů,
3. zavření shutteru,
4. natočení vzorku a opakování postupu pro další úhly,

přičemž se vzorek natáčel nejdříve do kladného směru, potom se znovu proměřila základní poloha a natáčelo se do záporného směru. Natočení do kladného směru mělo zvýšit odezvu na detektoru N a snížit odezvu na detektoru C. Pro porovnání bylo také proměřeno experimentální zařízení bez vzorku. Výkon reaktoru byl opět po celou dobu měření udržován na hladině 2E6, polohy řídících tyčí byly R1=457,5; R2=550; E1=311; E2=681.

6.5.1 Naměřená data

Celý soubor naměřených dat je opět uveden na CD, tentokrát v souboru 2013-04-19-detektor-X-02.csv, kde X je značka příslušného detektoru. Postup zpracování dat byl totožný, jako při prvním experimentu a je popsán v kapitole 6.4.1. Relativní změna odezvy detektorů je vztažena k základní poloze nanotrúbek (0°). Výsledky měření jsou uvedeny v tabulce Tab. 6-4. K datům byly pro porovnání přidány hodnoty naměřené s použitím neorientovaných nanotrúbek a měření bez vzorku.

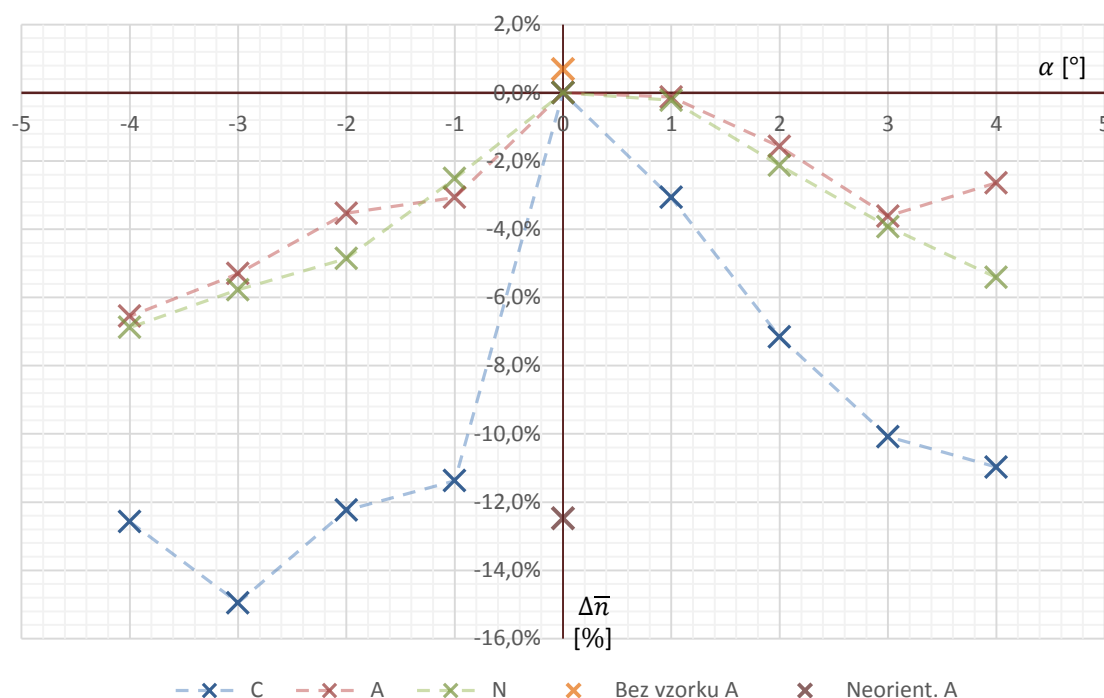
Tab. 6-4: Shrnutí výsledků experimentu 2

	detektor	Natočení α [°]									bez vzorku	CNT neorient.
		4	3	2	1	0	-1	-2	-3	-4		
\bar{n} [n · s ⁻¹]	C	18,03	18,21	18,80	19,63	20,25	17,95	17,78	17,22	17,71	22,53	19,96
	A	67,26	66,58	67,99	68,99	69,08	66,96	66,64	65,42	64,56	69,56	60,46
	N	68,08	69,15	70,44	71,82	71,98	70,17	68,48	67,82	67,02	73,43	71,31
$\Delta\bar{n}$ [%]	C	-11,0	-10,1	-7,2	-3,1	0,0	-11,4	-12,2	-15,0	-12,6	11,3	-1,4
	A	-2,6	-3,6	-1,6	-0,1	0,0	-3,1	-3,5	-5,3	-6,6	0,7	-12,5
	N	-5,4	-3,9	-2,1	-0,2	0,0	-2,5	-4,9	-5,8	-6,9	2,0	-0,9
s [n · s ⁻¹]	C	3,92	3,83	3,65	4,22	4,36	4,21	3,86	4,04	3,99	4,52	4,28
	A	8,09	7,64	7,16	8,08	7,69	7,42	8,65	7,86	7,92	8,54	7,80
	N	7,02	7,71	8,20	8,08	8,42	8,45	8,03	7,78	7,84	7,75	7,29
v [%]	C	21,8	21,0	19,4	21,5	21,5	23,4	21,7	23,4	22,5	20,1	21,5
	A	12,0	11,5	10,5	11,7	11,1	11,1	13,0	12,0	12,3	12,3	12,9
	N	10,3	11,2	11,6	11,3	11,7	12,0	11,7	11,5	11,7	10,5	10,2
H [μSv · s ⁻¹]	BS1	130	131	133	133	130	131	129	129	130	128	132

6.5.2 Zhodnocení experimentu

Z naměřených dat je vidět, že s rostoucím úhlem natočení odezva detektorů přibližně lineárně klesá neohledě na směr natočení. Názornou ukázkou podává graf na obrázku Obr. 6-11. Lze z něj vyčíst, že data z detektoru C jsou zatížena příliš velkou chybou z důvodu velmi slabého signálu. Na dalších dvou detektorech je patrný téměř lineární pokles odezvy s úhlem natočení. Při natočení o kladný úhel odezva zpočátku neklesá tak rychle, jako u úhlu záporného. Nejpravděpodobnějším vysvětlením tohoto jevu je ne zcela přesné nastavení nulového úhlu držáku – zde mohla vzniknout chyba přibližně 0,5° a tudíž je graf nepatrně posunut doprava. V grafu je pro porovnání též zaznamenána relativní změna odezvy detektorů při měření bez vzorku a s neorientovanými CNT. Při natočení 4° se pak zeslabení na orientovaných nanotrubičkách blíží hodnotě na trubičkách neorientovaných. Naopak v základní poloze byla zaznamenána odezva téměř stejná jako při měření bez vzorku, takže byla potvrzena hypotéza z experimentu 1, že neutrony orientovanými uhlíkovými nanotrubičkami při správném natočení prolétají bez výrazné interakce. Spojnice hodnot grafu jsou uvedeny pouze pro názornost. Skutečný průběh bude ve skutečnosti vypadat jinak.

Předpoklad, že nanotrubičky budou schopny změnit směr letu neutronů, se však nepotvrdil. Možným vysvětlením by mohla být příliš velká energie (rychlost) neutronů, které při cestě z aktivní zóny reaktoru ke vzorku neprocházejí významnou vrstvou moderátoru. Vzorkem tedy procházejí převážně neutrony rychlé s příliš krátkou vlnovou délkou na to, aby mohly být trubičkou ovlivněny. Neutronů s menšími energiemi byl ve svazku podstatně menší podíl, takže jejich vliv v celkovém výsledku zanikne v rámci nejistoty měření použitých přístrojů.



Obr. 6-11: Grafické znázornění výsledků experimentu 2

6.6 Experiment 3 – nepřímá detekce pomocí aktivačních detektorů

Cílem posledního experimentu bylo ověření dat z experimentu předchozího a jejich zpřesnění. Místo přímých detektorů neutronů byly použity aktivační detektory ve formě fólií. Tyto fólie byly umístěny na papírový podklad ve čtvercové síti 3 x 3 detektory, přičemž střední aktivační detektor nahrazoval prostřední detektor s přímým měřením. Toto rozmístění mělo umožnit přesnější změření rozložení a změny rozložení neutronového toku od vzorku. Rozmístění jednotlivých fólií na podkladu ukazuje obrázek Obr. 6-12. Sadě fólií (1) odpovídá měření v základní poloze, sadě fólií (2) potom měření při natočení vzorku 1°. Umístění aktivačních detektorů v experimentálním zařízení je vidět na obrázku Obr. 6-13.

(1)			(2)		
In4	I1	In3	In6	I3	In2
I7	II	BC	I5	JJ	C1
In8	D1	In7	In5	I4	In1

Obr. 6-12: Rozmístění fólií pro aktivační analýzu

Postup měření při tomto experimentu byl následující:

1. natočení vzorku do základní polohy (0°),
2. otevření shutteru,
3. ozařování fólií po dobu 30 minut,
4. zavření shutteru a otočení vzorku do polohy 1° ,
5. vyjmutí sady fólií (1) a vložení sady fólií (2),
6. opakování bodu 2. a 3.

Za aktivačními detektory byly pro kontrolu ponechány detektory přímé. Po skončení ozařování a vyjmutí fólií z kanálu byly tyto přeneseny do laboratoře a proměřeny γ spektrometrem.



Obr. 6-13: Umístění aktivačních detektorů v experimentálním zařízení

6.6.1 Naměřená a vypočtená data

Kompletní data naměřená γ spektrometrem jsou uvedena v příloze D. Příklad naměřeného spektra pro detektor „JJ“ je uveden v příloze F. Počet zachycených neutronů byl vypočten pomocí vzorců (6.2) a (6.4), chyba měření potom podle vzorců (6.5) a (6.6). Korekce na efektivitu detektoru byla provedena podle polynomu (6.4) a koeficientů uvedených v příloze E. Vypočtené hodnoty shrnuje tabulka Tab. 6-5. Celková hodnota příkonu fluence neutronů byla vypočtena jako vážený průměr všech vrcholů podle chyby měření:

$$N = \frac{\sum \frac{N(E_\gamma)}{\varepsilon_{err}(E_\gamma)}}{\sum \frac{1}{\varepsilon_{err}(E_\gamma)}}. \quad (6.9)$$

Tab. 6-5: Výsledky měření aktivační analýzou

fólie	In1	In2	In4	In5	In6	In8	I1	I3	I4	I5	I7	II	JJ	BC	D1	C1
N [g ⁻¹ .s ⁻¹]	233	248	193	186	292	214	251	277	236	330	266	315	364	291	251	226
ε_{err} [%]	29,3	25,6	32,3	28,9	22,7	23,2	30,6	23,2	33,2	22,3	32,0	27,7	22,9	30,8	26,8	27,1

Pro větší názornost jsou na následujících schématech výsledky zaznamenány do čtvercové sítě podle rozmístění fólií. Absolutní příkon fluence neutronů na jednotku hmotnosti detektoru za sekundu (N [g⁻¹.s⁻¹]) je zobrazen na obrázku Obr. 6-14, relativní rozložení vzhledem ke středu terče je na obrázku Obr. 6-15 a relativní změna při natočení o 1° oproti základní poloze je na obrázku Obr. 6-16. Hodnoty pro fólie In3 a In7 nejsou ve výsledcích uvedeny, protože spektra těchto detektorů nebyla z časových důvodů změřena (rozdíl času mezi ozařováním a měřením by byl příliš velký).

(1)

193	251	neměřeno
266	315	291
214	251	neměřeno

(2)

292	277	248
330	364	226
186	236	233

Obr. 6-14: Schématické zobrazení naměřených hodnot aktivační analýzy

(1)

-38,7%	-20,3%	neměřeno
-15,5%	100,0%	-7,8%
-32,2%	-20,4%	neměřeno

(2)

-19,7%	-23,8%	-31,9%
-9,2%	100,0%	-38,0%
-48,8%	-35,2%	-35,9%

Obr. 6-15: Relativní rozložení vzhledem ke středu terče

(2)

-	+10,2%	-
+24,0%	+15,4%	-22,4%
-	-6,1%	-

Obr. 6-16: Relativní změna při natočení o 1° oproti základní poloze

Jak je patrné z tabulky Tab. 6-5, nejistota měření aktivačních detektorů je pro správnou interpretaci výsledků příliš velká. Tato chyba byla způsobena především nízkým příkonem neutronů na aktivační detektory, takže celková aktivace byla příliš malá a spektrum druhotného γ záření se nedalo přesně změřit. Opatření pro zlepšení výsledků příštích měření by mohla být následující:

- zvýšení výkonu reaktoru – tím by se zvýšil i příkon neutronů na fólie,
- umístění měřicího zařízení do HRK – byla by nutná úprava zařízení pro zabránění vstupu neutronů ze strany,
- prodloužení délky ozařování – pro dosažení vyšší aktivace fólií,
- použití jiného materiálu aktivačních detektorů

7 ZÁVĚR

Práce shrnuje současné poznatky v oblasti nanotechnologií a možností jejich využití v jaderné energetice a jaderném výzkumu. Uvádí čtenáře do problematiky nanomateriálů, jejich definice a stavby. Dále podává stručný seznam v současnosti dostupných technologií výroby nanomateriálů a dává tak představu o možnostech, které v současnosti nabízejí. Hlavní část úvodu je věnována jednotlivým druhům materiálů a je diskutováno jejich použití v běžných aplikacích a hlavně v jaderné energetice, výzkumu a medicíně.

Mezi nejdůležitější materiály pro jadernou energetiku se řadí oxid titaničitý, který by mohl být použit pro výrobu velmi citlivých senzorů vodíku a dalších látek, v nanopórézní formě pak pro výrobu vysokokapacitních baterií pro záložní napájení. Alumina (Al_2O_3) ve formě nanočástic smíchaných s vodou tvoří nanotekutinu s vynikající tepelnou vodivostí a tepelnou kapacitou. Mohla by tak nahradit klasické chladivo jaderných reaktorů nebo zvyšovat účinnost tepelných výměníků. Kovové nanomateriály v různých formách jsou zase schopny zlepšit přestup tepla stěnou výměníku, např. ve formě měděných nebo křemíkových nanodrátů nadeponovaných na teplosměnnou plochu, několikanásobným zvětšením aktivního povrchu. Nanokapalina složená z vody a mědi zase rapidně snižuje multiplikační koeficient, takže by se dala použít k havarijnímu chlazení reaktoru. Povlaky vytvořené na stěnách kondenzátorů mohou mít hydrofobní vlastnosti, způsobovat kapkovou kondenzaci a tím zvyšovat jeho účinnost. Neutronová zrcadla by mohla být využitelná jako velmi účinný reflektor, stínění nebo pro konstrukci pokročilých neutronovodů.

Bezpochyby nejzajímavějším materiálem pro téměř všechny obory lidské činnosti jsou uhlíkové nanotrubičky a to ať jednotěnné nebo víceštěnné. Mohou být použity ve formě nanokompozitů vynikajících nízkou hmotností a vysokou pevností. Dále se dají použít pro výrobu kondenzátorů vysokých kapacit a velmi rychlých tranzistorů. Hlavním využitím v jaderné energetice by mohlo být jejich začlenění do vysoce citlivých detektorů plynů, pro bezpečné ukládání radioaktivních odpadů (zachycením velkých molekul štěpných produktů v nanotrubicích), ve formě nanokapalin opět jako velmi účinné chladivo a v neposlední řadě jako prvek neutronové optiky.

Právě omezené možnosti současné neutronové optiky jsou v práci dále rozebrány a diskutovány. Uhlík všeobecně patří mezi nejvhodnější materiály pro neutronovou optiku, v některých formách s nejvyšším poměrem odrazu k absorpci. Díky tomu, že nanotrubičky mohou dosahovat velikostí řádově srovnatelných s vlnovou délkou neutronů malých energií, nabízí se možnost vedení neutronů zahnutou trubicí podobně, jako je tomu se světlem v optických kabelech. Neutronovod sestavený z uhlíkových nanotrubek by mohl účinně vést svazek neutronů, ohýbat jej a fokusovat přímo na ozařovaný vzorek. Velký přínos by takový neutronovod znamenal pro bórovou záchytovou neutronovou terapii, kde by zvýšil hustotu neutronového toku v místě nádoru, omezil ozáření zdravé tkáně a snížil časy potřebné pro ozařování. Je ale nejdříve třeba provést celou řadu simulací a experimentů s nanotrubkami, zejména vyvinout kvalitní a spolehlivé simulační nástroje, jelikož běžná prostředí pro simulace neutronové optiky na rozměrech řádu nanometrů a nízkých energiích selhávají.

V praktické části práce bylo provedeno několik experimentů pro ověření vlastností různých nanomateriálů a jejich vlivu na neutronový svazek. Bylo sestaveno experimentální zařízení, které pasivní kolimací zajišťovalo úzký svazek neutronů dopravovaný na vzorek. V prvním experimentu byly otestovány neorientované uhlíkové nanotrubičky, uhlíková nanovlákna a

nanodráty z aluminu. Výsledek byl srovnán se stejně velkým vzorkem grafitu. Bylo zjištěno, že přes jejich vyšší hustotu propouštějí nanotrubky více neutronů, než nanovlákná. Možným vysvětlením by mohla být snaha neutronů prolétat volným prostorem v centru nanotrubky, díky čemuž dochází k menšímu rozptylu neutronů na stěnách trubek. V druhém experimentu byly použity orientované uhlíkové nanotrubky a byla proměřena odezva přímých detektorů neutronů při různém úhlu natočení trubek. Tento experiment potvrdil výsledky prvního, bylo zjištěno, že nanotrubky v základní poloze (natočené do směru přicházejících neutronů) propouští neutronů podstatně více, než při jejich natočení v řádu jednotek stupňů. Již při natočení o 4° se pak zeslabení přibližovalo nanotrúbkám neorientovaným.

Poslední experiment měl za úkol potvrdit výsledky experimentu druhého a zjistit případný ohyb neutronového svazku při malém natočení. Měření bylo provedeno aktivační analýzou. Z časových důvodů však nebylo možné aktivační detektory ozařovat po dostatečně dlouhou dobu a v kombinaci s malou hustotou neutronového toku byla nejistota měření příliš velká. Naměřené výsledky tedy není možné spolehlivě interpretovat.

Tato práce kromě přehledného shrnutí problematiky a výsledků experimentů také podává návod a podněty pro provádění dalších podobných experimentů a jejich vylepšení. Bylo sestrojeno experimentální zařízení, které bude možno použít pro kolimaci neutronů v měřicím boxu napojeném na horizontální radiální kanál školního reaktoru VR-1 pro přesné ozařování velmi malých vzorků, nebo v jakékoliv jiné laboratoři ionizujícího záření.

POUŽITÁ LITERATURA

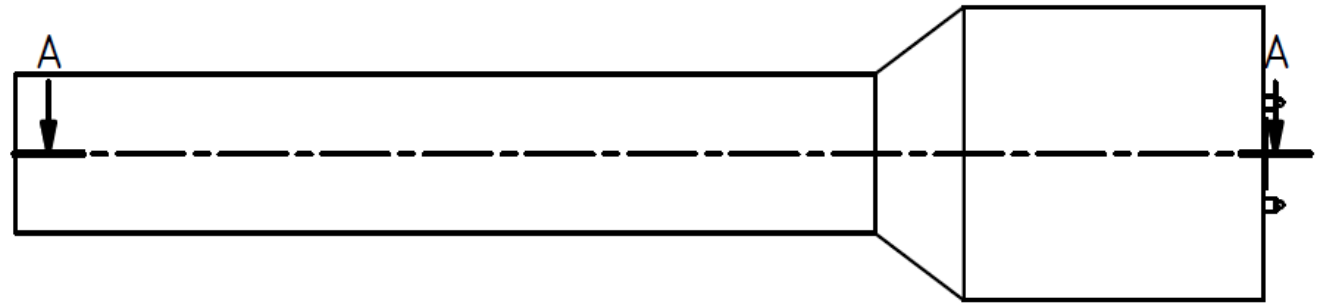
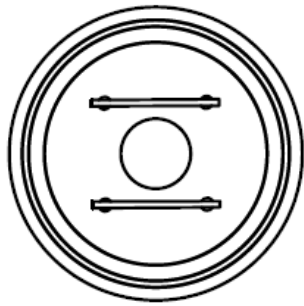
- [1] BANG, In-Cheol a Ji-Hwan JEONG. Nanotechnology for advanced nuclear thermal-hydraulics and safety: boiling and condensation. *Nuclear Engineering and Technology*. 2011-06-25, vol. 43, issue 3, s. 217-242. DOI: 10.5516/NET.2011.43.3.217. Dostupné z: <http://koreascience.or.kr/journal/view.jsp?kj=OJRHBJ>
- [2] BARTHELMY, D. Mineral Species containing Indium. *Mineralogy database* [online]. 2010 [cit. 2013-05-23]. Dostupné z: <http://webmineral.com/chem/Chem-In.shtml>
- [3] BRADLEY C. EDWARDS, Bradley C.Eric A. *The space elevator*. San Francisco, CA: Spageo Inc, 2003. ISBN 09-726-0450-2.
- [4] BROCK, David C a Gordon E MOORE. *Understanding Moore's law: four decades of innovation*. Philadelphia, Pa.: Chemical Heritage Foundation, c2006, 122 p. ISBN 978-094-1901-413.
- [5] CAPIVIA. *Nanovia* [online]. 2012 [cit. 2012-12-22]. Dostupné z: <http://www.nanovia-technologies.com/>
- [6] CERN. *Geant 4: A toolkit for the simulation of the passage of particles through matter* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://geant4.web.cern.ch/geant4/>
- [7] CURL, R. F. a R. E. SMALLEY. Probing C60. *Science*. 1988-11-18, vol. 242, issue 4881, s. 1017-1022. DOI: 10.1126/science.242.4881.1017. Dostupné z: <http://www.sciencemag.org/cgi/doi/10.1126/science.242.4881.1017>
- [8] ERKO, Alexei. *Modern developments in x-ray and neutron optics*. New York: Springer, 2008, p. cm. ISBN 978-354-0745-600.
- [9] FILIPOVÁ, Z., J. KUKUTSCHOVÁ a M. MAŠLÁŇ. *Rizika nanomateriálů* [online]. 1. vyd. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012, 87 s. [cit. 2013-04-26]. ISBN 978-80-244-3201-4. Dostupné z: <http://fyzika.upol.cz/cs/system/files/download/vujtek/rizika.pdf>
- [10] GUSEV, A. I. *Gas-phase synthesis with vapour condensation* [online]. 2012 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <http://eng.thesaurus.rusnano.com/wiki/article707>
- [11] HAVRÁNEK, M. *Grafen – materiál, kde elektrony ztrácejí hmotnost* [online]. 2009 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_26_gra.php
- [12] HOŠEK, Jan. *Úvod do nanotechnologie*. Vyd. 1. V Praze: České vysoké učení technické, 2011, 170 s. ISBN 9788001045558.
- [13] IAEA-Tecdok: *Current status of neutron capture therapy*. Wien: IAEA, 2001, č. 1223. ISSN 1011-4289. Dostupné z: http://www-pub.iaea.org/MTCD/publications/PDF/te_1223_prn.pdf

- [14] ISO/TS 27687. *Nanotechnologies — Terminology and definitions for nano-objects*. 2008. vyd. ISO.
- [15] KATEDRA FYZIKY PŘF OU. *Nestacionární Schrödingerova rovnice* [online]. 2012 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: http://artemis.osu.cz/mm fyz/qm/qm_4_3.htm
- [16] KITTEL, C. *Úvod do fyziky pevných látek*. Praha: Academia, 1985, 598 s.
- [17] KJR FJFI ČVUT V PRAZE. *Školní reaktor VR-1* [online]. 2012 [cit. 2012-12-21]. Dostupné z: <http://www.reaktorvr1.eu/>
- [18] KOLROS, A. KJCH FJFI ČVUT. *Neutron detection*. Praha, 2008. Dostupné z: <http://www.fjfi.cvut.cz/kjch/materialy/RCHP/En/Neutron.pdf>
- [19] KUMAR, M. a A. YOSHINORI. Chemical Vapor Deposition of Carbon Nanotubes: A Review on Growth Mechanism and Mass Production. *Journal of Nanoscience and Nanotechnology*. 2010, č. 10, s. 20. Dostupné z: <http://www.rz.meijo-u.ac.jp/labo/ando/ando-j/CNT%20Review%20Mukul.pdf>
- [20] MARŠÁLEK, L. VŠB - TECHNICKÁ UNIVERZITA OSTRAVA. *Optická vlákna: verze 2.1.3*. Ostrava, 2008, 172 s. Dostupné z: <http://goro.czweb.org/download/interest/vlakna.pdf>
- [21] NOHAVICA, D. Rizika nanomateriálů a nanotechnologií pro lidské zdraví a životní prostředí. *Československý časopis pro fyziku*. Česká republika: Akademie věd České republiky, 2011, roč. 2011, č. 3, str. 220 - 227. ISSN 0009-0700. Dostupné z: <http://www.ufe.cz/media/nohavica-rizika-nanomaterialu-2011.pdf>
- [22] PAN, Zicheng, Hong SUN, Yi ZHANG a Changfeng CHEN. Harder than Diamond: Superior Indentation Strength of Wurtzite BN and Lonsdaleite. *Physical Review Letters*. 2009, vol. 102, issue 5, s. -. DOI: 10.1103/PhysRevLett.102.055503. Dostupné z: <http://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.102.055503>
- [23] PETŘÍK, S. a M. MALÝ. Production of Nozzle-Less electrospinning Nanofiber Technology. 2012, s. 12. Dostupné z: <http://www.elmarco.cz/upload/soubory/dokumenty/66-1-1-mrs-fall-boston-09.pdf>
- [24] PURDUE UNIVERSITY. *Quantum Numbers and Electron Configurations* [online]. 2012 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <http://chemed.chem.purdue.edu/genchem/topicreview/bp/ch6/quantum.html>
- [25] PROCHÁZKA, P. *Příprava grafenu metodou CVD*. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Vedoucí práce Ing. Jindřich Mach, Ph.D.

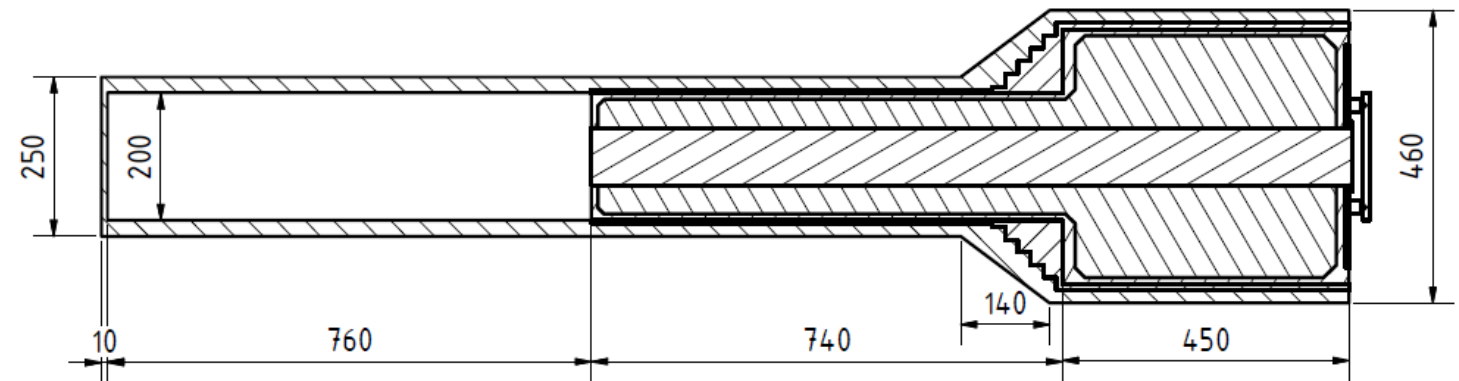
- [26] REICHL, J. a M. VŠETIČKA. *Ideální krystalová mřížka* [online]. 2012 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/623-idealni-krystalova-mrizka>
- [27] Restrax. ÚJF AV ČR. *ÚJF AV ČR* [online]. 2013 [cit. 2013-05-16]. Dostupné z: <http://neutron.ujf.cas.cz/restrax/>
- [28] SHELLZERO. *Inert Gas Condensation Method* [online]. 2012 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <http://shellzero.wordpress.com/2012/05/14/inert-gas-condensation-method/>
- [29] SIGMA-ALDRICH. Carbon Nanofibers. *Sigma-Aldrich* [online]. 2013 [cit. 2013-05-10]. Dostupné z: <http://www.sigmaaldrich.com/materials-science/nanomaterials/carbon-nanofibers.html>
- [30] SODOMKA, Lubomír a Magdalena SODOMKOVÁ. *Nobelovy ceny za fyziku 1901-1997*. 1. vyd. Praha: Set out, 1997, 158 s. Historica. ISBN 80-902-0585-2.
- [31] STATE UNIVERSITY OF NEW YORK. *Aluminum Activation* [online]. 2013 [cit. 2013-04-26]. Dostupné z: <http://www.geneseo.edu/nuclear/aluminum-activation>
- [32] ŠOLTÉS, J. Stanovenie tepelného výkonu reaktora VR-1 pomocou aktivačních detektorov. In: *Jaderná energetika, transmutační a vodíkové technologie v pracích mladé generace - 2011*. Brno: FSI VUT, 2011, s. 57-63. ISBN 978-80-02-02360-9. Dostupné z: <http://www.csvts.cz/cns/mikulas/sborniky/2011.pdf>
- [33] ŠTEFÁNIK, Milan. *Neutronová aktivačná analýza na horizontálnom radiálnom kanále školského reaktora VR-1*. Praha, 2009. Diplomová práce. FJFI ČVUT Praha. Vedoucí práce Ing. Karel Katovský, Ph.D.
- [34] THE-CRANKSHAFT PUBLISHING. *Nanocrystalline Materials: Synthesis and Properties Part 2* [online]. 2012 [cit. 2012-12-01]. Dostupné z: <http://what-when-how.com/nanoscience-and-nanotechnology/nanocrystalline-materials-synthesis-and-properties-part-2-nanotechnology/>
- [35] THE UNIVERSITY OF TEXAS AT EL PASO. *Fabrication techniques* [online]. 2012 [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: <http://wwwold.ece.utep.edu/research/webedl/cdte/Fabrication/index.htm>
- [36] TROJEK, T., M. VINŠ, Z. LAHODOVÁ a L. VIERERBL. UJV ŘEŽ a.s.. *Kolimace neutronů pomocí nanotrubek a dalších prvků neutronové optiky*. Řež, 2010.
- [37] VYDAVATELSTVÍ VŠCHT PRAHA. *Film (monovrstva) Langmuirův a Blodgettové* [online]. 2012 [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: http://vydavatelstvi.vscht.cz/knihy/uid_es-001/hesla/film_langmuiruv_a_blodgettove.html

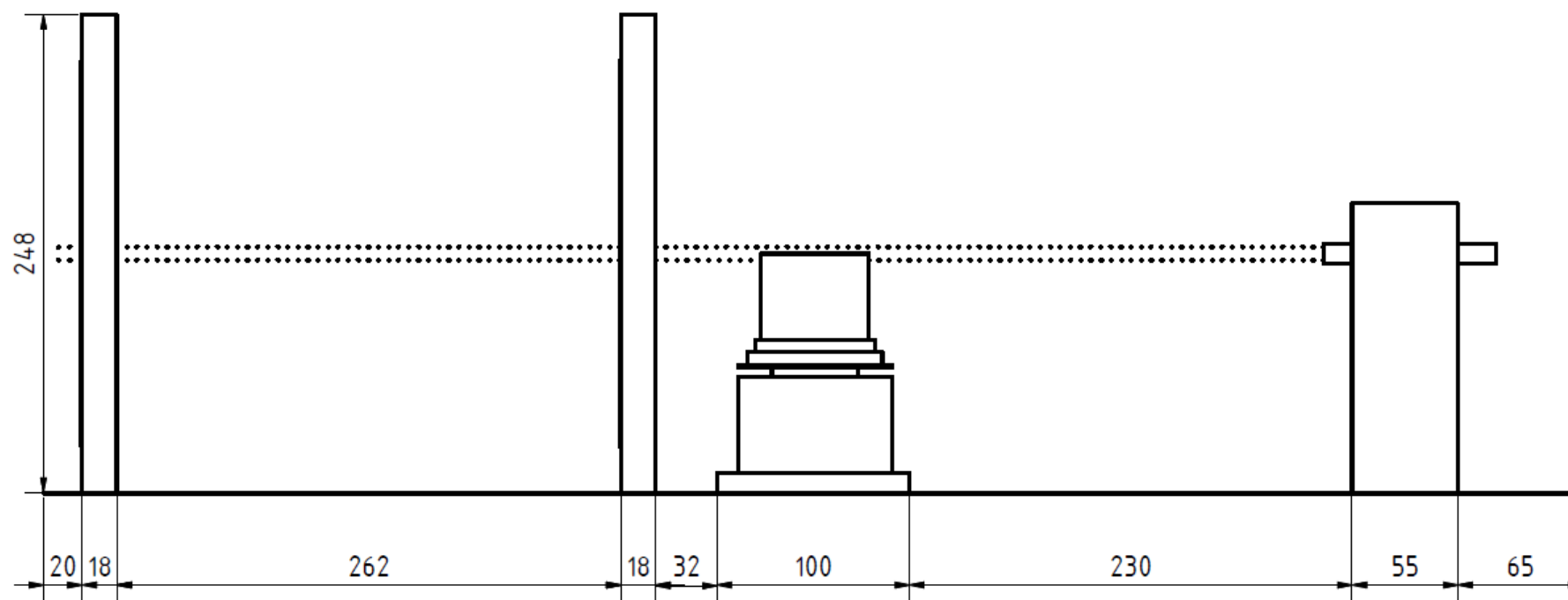
-
- [38] WAGNER, V. Urychlovače v boji proti nádorům. ÚJF AVČR ŘEŽ A FJFI ČVUT PRAHA. *Ústav jaderné fyziky AV ČR* [online]. 2013 [cit. 2013-05-12]. Dostupné z: <http://hp.ujf.cas.cz/~wagner/popclan/nadory/hadronovaterapie.html>
- [39] WOLFRAM ALPHA LLC. *Wolfram/Alpha* [online]. 2012 [cit. 2012-12-02]. Dostupné z: <http://www.wolframalpha.com/>

PŘÍLOHA A: SCHÉMA HORIZONTÁLNÍHO RADIÁLNÍHO KANÁLU

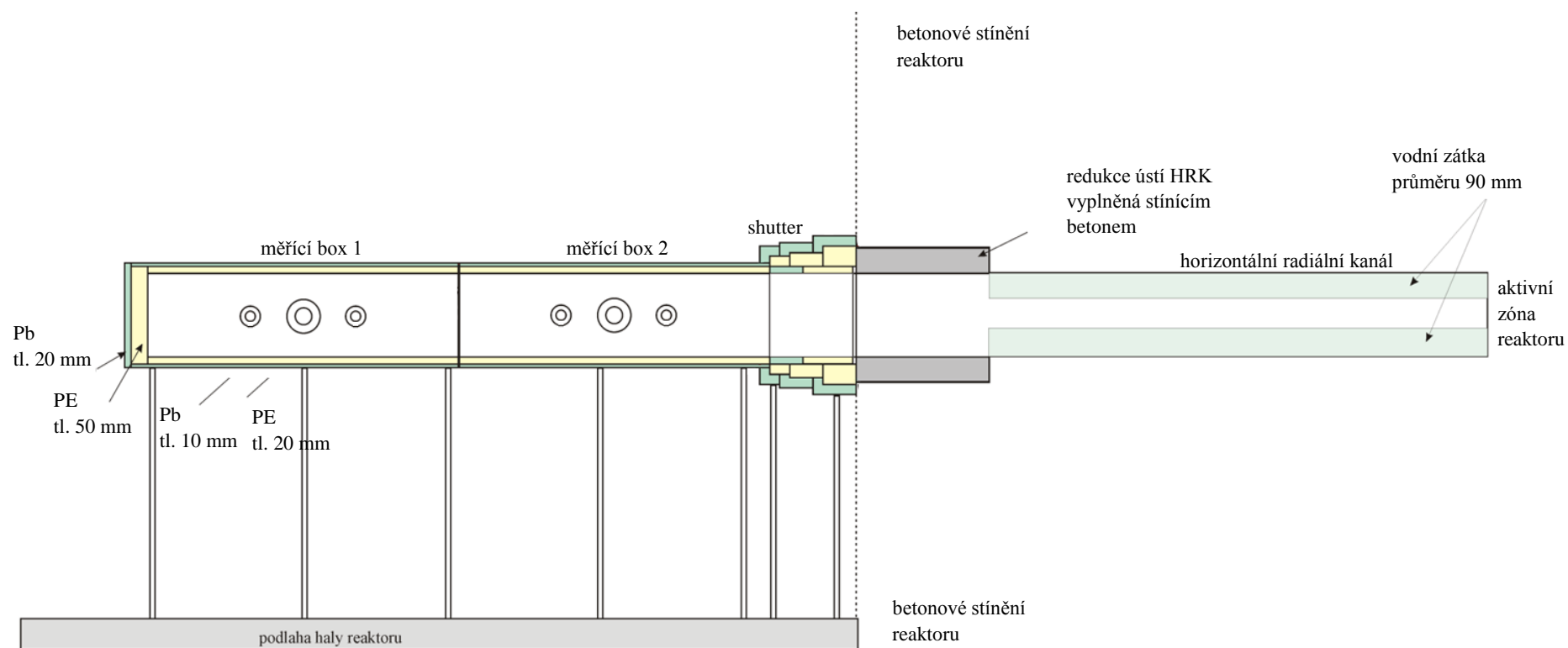


A-A (1 : 10)



PŘÍLOHA B: SCHÉMA EXPERIMENTÁLNÍHO ZAŘÍZENÍ

PŘÍLOHA C: SCHÉMA PŘIPOJENÍ MĚŘICÍHO BOXU K HRK



Autor: Ing. Jan Rataj, Ph.D.

PŘÍLOHA D: NAMĚŘENÁ A VYPOČTENÁ DATA Z AKTIVAČNÍ ANALÝZY

Začátek ozařování	15:33	15:33	15:33		15:33	15:33	15:33		14:55	14:55	14:55
Konec ozařování	16:03	16:03	16:03		16:03	16:03	16:03		15:25	15:25	15:25
t_a [s]	1800,00	1800,00	1800,00		1800,00	1800,00	1800,00		1800,00	1800,00	1800,00
ε_{ta} [-]	18,00	18,00	18,00		18,00	18,00	18,00		18,00	18,00	18,00
Označení fólie	In1	In1	In1		In2	In2	In2		In4	In4	In4
Poloha ozařování	3 mm	3 mm	3 mm		3 mm	3 mm	3 mm		3 mm	3 mm	3 mm
m_v [g]	0,2165	0,2165	0,2165		0,2157	0,2157	0,2157		0,2174	0,2174	0,2174
ε_m [-]	0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
E_γ [keV]	1293,558	1097,326	416,860		1293,558	1097,326	416,860		1293,558	1097,326	416,860
ε_E [-]	0,0150	0,0220	0,0300		0,0150	0,0220	0,0300		0,0150	0,0220	0,0300
I_γ [-]	0,8440	0,5620	0,2770		0,8440	0,5620	0,2770		0,8440	0,5620	0,2770
ε_I [-]	0,017	0,011	0,012		0,017	0,011	0,012		0,017	0,011	0,012
$S(E_\gamma)$ [keV]	26,0	40,0	46,0		41,0	27,0	31,0		36,0	48,0	60,0
err_s [%]	31,6	18,2	18,2		16,7	19,2	24,6		31,0	24,2	22,1
ε_s [-]	8,2	7,3	8,4		6,8	5,2	7,6		11,2	11,6	13,3
t_{live} [s]	538,0	538,0	538,0		377,2	377,2	377,2		2072,1	2072,1	2072,1
t_{real} [s]	538,2	538,2	538,2		377,3	377,3	377,3		2072,7	2072,7	2072,7
t_{dead} [%]	0,04	0,04	0,04		0,03	0,03	0,03		0,03	0,03	0,03
Začátek měření	17:14	17:14	17:14		17:08	17:08	17:08		17:39	17:39	17:39
t_v [s]	1,1922	1,1922	1,1922		1,0769	1,0769	1,0769		2,2325	2,2325	2,2325
$T_{1/2}$ [m]	54,29000	54,29000	54,29000		54,29000	54,29000	54,29000		54,29000	54,29000	54,29000
$\varepsilon_{T1/2}$ [-]	0,17000	0,17000	0,17000		0,17000	0,17000	0,17000		0,17000	0,17000	0,17000
λ [s ⁻¹]	2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04		2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04		2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04
ε_{FEP}^γ [-]	0,01784	0,02079	0,05213		0,01784	0,02079	0,05213		0,01784	0,02079	0,05213
ε_{ef} [-]	0,00054	0,00062	0,00156		0,00054	0,00062	0,00156		0,00054	0,00062	0,00156
k_{iz} [%]	95,70	95,70	95,70		95,70	95,70	95,70		95,70	95,70	95,70
ε_{iv} [%]	0,20	0,20	0,20		0,20	0,20	0,20		0,20	0,20	0,20
N [g ⁻¹ .s ⁻¹]	128,5	254,6	236,9		261,1	221,5	205,8		119,2	204,8	207,2
$\varepsilon_{err}(E_\gamma)$ [%]	31,82	18,58	18,98		17,12	19,56	25,18		31,23	24,49	22,74

Začátek ozařování	15:33	15:33	15:33			15:33	15:33		14:55	14:55	14:55
Konec ozařování	16:03	16:03	16:03			16:03	16:03		15:25	15:25	15:25
t_a [s]	1800,00	1800,00	1800,00			1800,00	1800,00		1800,00	1800,00	1800,00
ε_{ta} [-]	18,00	18,00	18,00			18,00	18,00		18,00	18,00	18,00
Označení fólie	In5	In5	In5			In6	In6		In8	In8	In8
Poloha ozařování	3 mm	3 mm	3 mm			3 mm	3 mm		3 mm	3 mm	3 mm
m_v [g]	0,2168	0,2168	0,2168			0,2165	0,2165		0,2167	0,2167	0,2167
ε_m [-]	0,000	0,000	0,000			0,000	0,000		0,000	0,000	0,000
E_γ [keV]	1293,558	1097,326	416,860			1097,326	416,860		1293,558	1097,326	416,860
ε_E [-]	0,0150	0,0220	0,0300			0,0220	0,0300		0,0150	0,0220	0,0300
I_γ [-]	0,8440	0,5620	0,2770			0,5620	0,2770		0,8440	0,5620	0,2770
ε_I [-]	0,017	0,011	0,012			0,011	0,012		0,017	0,011	0,012
$S(E_\gamma)$ [keV]	38,0	37,0	44,0			37,0	56,0		47,0	47,0	45,0
err_s [%]	23,0	22,6	23,9			16,4	14,3		18,6	16,4	20,0
ε_s [-]	8,7	8,4	10,5			6,1	8,0		8,7	7,7	9,0
t_{live} [s]	767,8	767,8	767,8			421,0	421,0		304,3	304,3	304,3
t_{real} [s]	768,0	768,0	768,0			421,1	421,1		304,3	304,3	304,3
t_{dead} [%]	0,03	0,03	0,03			0,02	0,02		0,00	0,00	0,00
Začátek měření	17:24	17:24	17:24			17:00	17:00		15:34	15:34	15:34
t_v [s]	1,3508	1,3508	1,3508			0,9503	0,9503		0,1569	0,1569	0,1569
$TI/2$ [m]	54,29000	54,29000	54,29000			54,29000	54,29000		54,29000	54,29000	54,29000
$\varepsilon_{TI/2}$ [-]	0,17000	0,17000	0,17000			0,17000	0,17000		0,17000	0,17000	0,17000
λ [s ⁻¹]	2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04			2,13E-04	2,13E-04		2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04
ε_{FEP}^Y [-]	0,01784	0,02079	0,05213			0,02079	0,05213		0,01784	0,02079	0,05213
ε_{ef} [-]	0,00054	0,00062	0,00156			0,00062	0,00156		0,00054	0,00062	0,00156
k_{iz} [%]	95,70	95,70	95,70			95,70	95,70		95,70	95,70	95,70
ε_{iv} [%]	0,20	0,20	0,20			0,20	0,20		0,20	0,20	0,20
N [g ⁻¹ .s ⁻¹]	151,9	190,6	183,4			247,0	302,5		181,1	233,3	180,8
$\varepsilon_{err}(E_\gamma)$ [%]	23,31	22,91	24,50			16,82	15,28		18,98	16,82	20,71

Začátek ozařování	14:55		14:55		15:33	15:33	15:33			15:33	15:33
Konec ozařování	15:25		15:25		16:03	16:03	16:03			16:03	16:03
t_a [s]	1800,00		1800,00		1800,00	1800,00	1800,00			1800,00	1800,00
ε_{ta} [-]	18,00		18,00		18,00	18,00	18,00			18,00	18,00
Označení fólie	I1		I1		I3	I3	I3			I4	I4
Poloha ozařování	3 mm		3 mm		3 mm	3 mm	3 mm			3 mm	3 mm
m_v [g]	0,1265		0,1265		0,1399	0,1399	0,1399			0,1532	0,1532
ε_m [-]	0,000		0,000		0,000	0,000	0,000			0,000	0,000
$E\gamma$ [keV]	1293,558		416,860		1293,558	1097,326	416,860			1097,326	416,860
ε_E [-]	0,0150		0,0300		0,0150	0,0220	0,0300			0,0220	0,0300
$I\gamma$ [-]	0,8440		0,2770		0,8440	0,5620	0,2770			0,5620	0,2770
ε_I [-]	0,017		0,012		0,017	0,011	0,012			0,011	0,012
$S(E_\gamma)$ [keV]	40,0		37,0		45,0	40,0	49,0			36,0	44,0
err_s [%]	21,4		20,9		18,9	19,3	16,9			25,4	20,4
ε_s [-]	8,6		7,7		8,5	7,7	8,3			9,1	9,0
t_{live} [s]	387,7		387,7		365,2	365,2	365,2			569,2	569,2
t_{real} [s]	387,9		387,9		365,3	365,3	365,3			569,4	569,4
t_{dead} [%]	0,05		0,05		0,03	0,03	0,03			0,04	0,04
Začátek měření	15:47		15:47		16:17	16:17	16:17			16:50	16:50
t_v [s]	0,3633		0,3633		0,2325	0,2325	0,2325			0,7789	0,7789
$T1/2$ [m]	54,29000		54,29000		54,29000	54,29000	54,29000			54,29000	54,29000
$\varepsilon_{T1/2}$ [-]	0,17000		0,17000		0,17000	0,17000	0,17000			0,17000	0,17000
λ [s ⁻¹]	2,13E-04		2,13E-04		2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04			2,13E-04	2,13E-04
ε_{FFP}^Y [-]	0,01784		0,05213		0,01784	0,02079	0,05213			0,02079	0,05213
ε_{ef} [-]	0,00054		0,00156		0,00054	0,00062	0,00156			0,00062	0,00156
k_{iz} [%]	95,70		95,70		95,70	95,70	95,70			95,70	95,70
ε_{iv} [%]	0,20		0,20		0,20	0,20	0,20			0,20	0,20
N [g ⁻¹ .s ⁻¹]	244,9		236,1		238,7	273,3	270,9			223,8	221,3
$\varepsilon_{err}(E\gamma)$ [%]	21,73		21,58		19,27	19,66	17,73			25,67	21,10

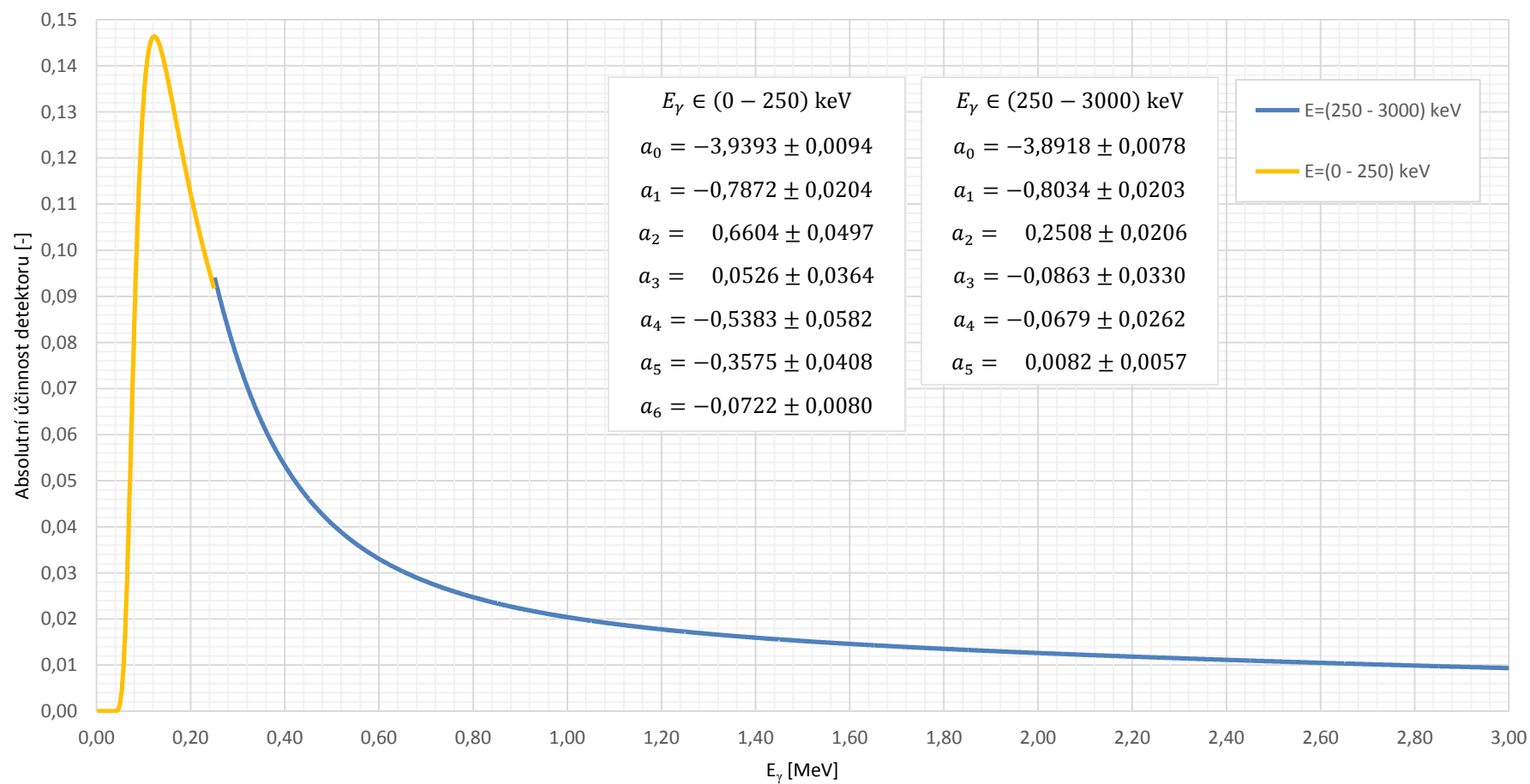
Začátek ozařování	15:33	15:33			14:55		14:55		14:55	14:55	14:55
Konec ozařování	16:03	16:03			15:25		15:25		15:25	15:25	15:25
t_a [s]	1800,00	1800,00			1800,00		1800,00		1800,00	1800,00	1800,00
ε_{ta} [-]	18,00	18,00			18,00		18,00		18,00	18,00	18,00
Označení fólie	I5	I5			I7		I7		II	II	II
Poloha ozařování	3 mm	3 mm			3 mm		3 mm		3 mm	3 mm	3 mm
m_v [g]	0,1387	0,1387			0,1453		0,1453		0,1156	0,1156	0,1156
ε_m [-]	0,000	0,000			0,000		0,000		0,000	0,000	0,000
$E\gamma$ [keV]	1293,558	1097,326			1293,558		416,860		1293,558	1097,326	416,860
ε_E [-]	0,0150	0,0220			0,0150		0,0300		0,0150	0,0220	0,0300
$I\gamma$ [-]	0,8440	0,5620			0,8440		0,2770		0,8440	0,5620	0,2770
ε_I [-]	0,017	0,011			0,017		0,012		0,017	0,011	0,012
$S(E_\gamma)$ [keV]	53,0	58,0			36,0		34,0		34,0	37,0	35,0
err_s [%]	13,7	16,8			19,8		24,3		23,3	22,2	21,0
ε_s [-]	7,3	9,7			7,1		8,3		7,9	8,2	7,4
t_{live} [s]	548,8	548,8			355,5		355,5		316,2	316,2	316,2
t_{real} [s]	548,9	548,9			355,6		355,6		316,3	316,3	316,3
t_{dead} [%]	0,02	0,02			0,03		0,03		0,03	0,03	0,03
Začátek měření	16:40	16:40			16:03		16:03		15:40	15:40	15:40
t_v [s]	0,6167	0,6167			0,6328		0,6328		0,2561	0,2561	0,2561
$TI/2$ [m]	54,29000	54,29000			54,29000		54,29000		54,29000	54,29000	54,29000
$\varepsilon_{TI/2}$ [-]	0,17000	0,17000			0,17000		0,17000		0,17000	0,17000	0,17000
λ [s ⁻¹]	2,13E-04	2,13E-04			2,13E-04		2,13E-04		2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04
ε_{FFP}^Y [-]	0,01784	0,02079			0,01784		0,05213		0,01784	0,02079	0,05213
ε_{ef} [-]	0,00054	0,00062			0,00054		0,00156		0,00054	0,00062	0,00156
k_{iz} [%]	95,70	95,70			95,70		95,70		95,70	95,70	95,70
ε_{iy} [%]	0,20	0,20			0,20		0,20		0,20	0,20	0,20
N [g ⁻¹ .s ⁻¹]	258,1	363,9			256,3		252,4		255,3	358,0	274,0
$\varepsilon_{err}(E\gamma)$ [%]	14,21	17,21			20,16		24,89		23,60	22,51	21,68

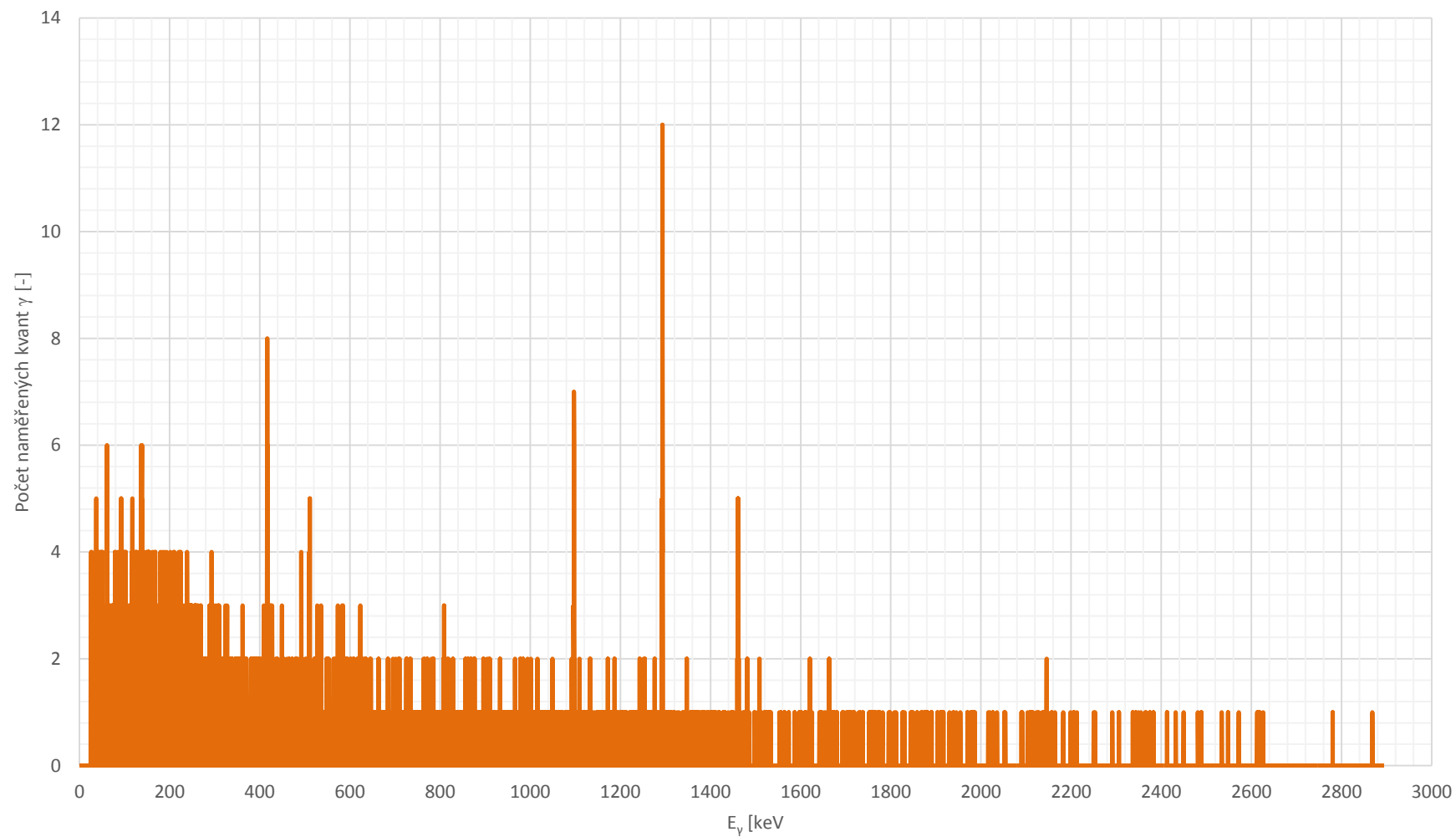
Začátek ozařování	15:33	15:33	15:33		14:55		14:55		14:55	14:55	14:55
Konec ozařování	16:03	16:03	16:03		15:25		15:25		15:25	15:25	15:25
t_a [s]	1800,00	1800,00	1800,00		1800,00		1800,00		1800,00	1800,00	1800,00
ε_{ta} [-]	18,00	18,00	18,00		18,00		18,00		18,00	18,00	18,00
Označení fólie	JJ	JJ	JJ		BC		BC		D1	D1	D1
Poloha ozařování	3 mm	3 mm	3 mm		3 mm		3 mm		3 mm	3 mm	3 mm
m_v [g]	0,1174	0,1174	0,1174		0,1447		0,1447		0,1481	0,1481	0,1481
ε_m [-]	0,000	0,000	0,000		0,000		0,000		0,000	0,000	0,000
$E\gamma$ [keV]	1293,558	1097,326	416,860		1293,558		416,860		1293,558	1097,326	416,860
ε_E [-]	0,0150	0,0220	0,0300		0,0150		0,0300		0,0150	0,0220	0,0300
$I\gamma$ [-]	0,8440	0,5620	0,2770		0,8440		0,2770		0,8440	0,5620	0,2770
ε_I [-]	0,017	0,011	0,012		0,017		0,012		0,017	0,011	0,012
$S(E\gamma)$ [keV]	45,0	42,0	38,0		31,0		45,0		45,0	38,0	47,0
err_s [%]	19,1	16,4	18,9		22,9		19,6		18,8	24,2	21,0
ε_s [-]	8,6	6,9	7,2		7,1		8,8		8,5	9,2	9,9
t_{live} [s]	345,0	345,0	345,0		392,9		392,9		451,4	451,4	451,4
t_{real} [s]	345,1	345,1	345,1		393,1		393,1		451,5	451,5	451,5
t_{dead} [%]	0,03	0,03	0,03		0,05		0,05		0,02	0,02	0,02
Začátek měření	16:24	16:24	16:24		16:10		16:10		15:54	15:54	15:54
t_v [s]	0,3503	0,3503	0,3503		0,7442		0,7442		0,4911	0,4911	0,4911
$TI/2$ [m]	54,29000	54,29000	54,29000		54,29000		54,29000		54,29000	54,29000	54,29000
$\varepsilon_{TI/2}$ [-]	0,17000	0,17000	0,17000		0,17000		0,17000		0,17000	0,17000	0,17000
λ [s ⁻¹]	2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04		2,13E-04		2,13E-04		2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04
ε_{FFP}^Y [-]	0,01784	0,02079	0,05213		0,01784		0,05213		0,01784	0,02079	0,05213
ε_{ef} [-]	0,00054	0,00062	0,00156		0,00054		0,00156		0,00054	0,00062	0,00156
k_{iz} [%]	95,70	95,70	95,70		95,70		95,70		95,70	95,70	95,70
ε_{iv} [%]	0,20	0,20	0,20		0,20		0,20		0,20	0,20	0,20
N [g ⁻¹ .s ⁻¹]	328,8	395,3	289,4		219,3		331,8		224,4	244,1	244,3
$\varepsilon_{err}(E\gamma)$ [%]	19,47	16,82	19,65		23,21		20,32		19,17	24,49	21,68

Začátek ozařování	15:33	15:33	15:33								
Konec ozařování	16:03	16:03	16:03								
t_a [s]	1800,00	1800,00	1800,00								
ε_{ta} [-]	18,00	18,00	18,00								
Označení fólie	C1	C1	C1								
Poloha ozařování	3 mm	3 mm	3 mm								
m_v [g]	0,1466	0,1466	0,1466								
ε_m [-]	0,000	0,000	0,000								
E_γ [keV]	1293,558	1097,326	416,860								
ε_E [-]	0,0150	0,0220	0,0300								
I_γ [-]	0,8440	0,5620	0,2770								
ε_I [-]	0,017	0,011	0,012								
$S(E_\gamma)$ [keV]	34,0	41,0	55,0								
err_s [%]	25,6	21,3	17,3								
ε_s [-]	8,7	8,7	9,5								
t_{live} [s]	518,5	518,5	518,5								
t_{real} [s]	518,7	518,7	518,7								
t_{dead} [%]	0,04	0,04	0,04								
Začátek měření	16:31	16:31	16:31								
t_v [s]	0,4603	0,4603	0,4603								
$T1/2$ [m]	54,29000	54,29000	54,29000								
$\varepsilon_{T1/2}$ [-]	0,17000	0,17000	0,17000								
λ [s ⁻¹]	2,13E-04	2,13E-04	2,13E-04								
ε_{FFP}^V [-]	0,01784	0,02079	0,05213								
ε_{ef} [-]	0,00054	0,00062	0,00156								
k_{iz} [%]	95,70	95,70	95,70								
ε_{iv} [%]	0,20	0,20	0,20								
N [g ⁻¹ .s ⁻¹]	146,6	227,8	247,3								
$\varepsilon_{err}(E_\gamma)$ [%]	25,88	21,63	18,12								

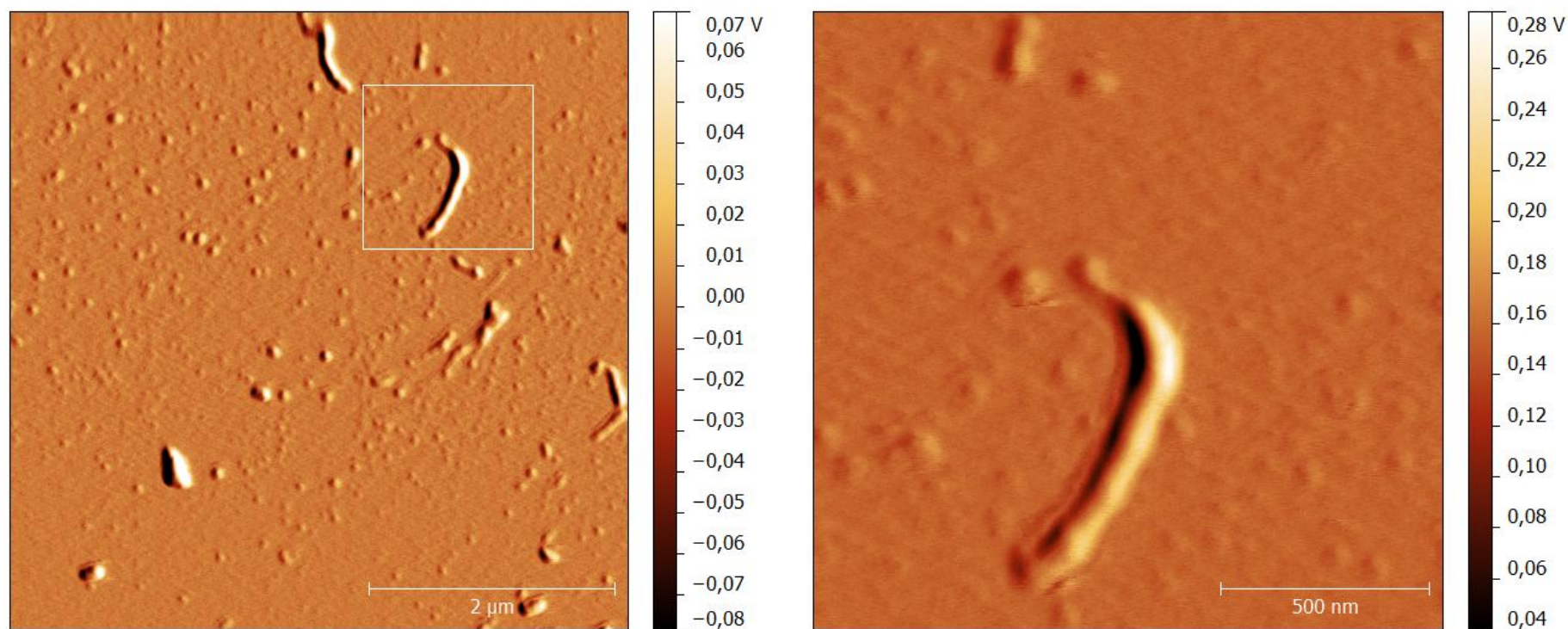
PŘÍLOHA E: KOREKČNÍ Činitele PRO HPGe DETEKTOR

Korekce efektivity pro geometrii "3 mm"

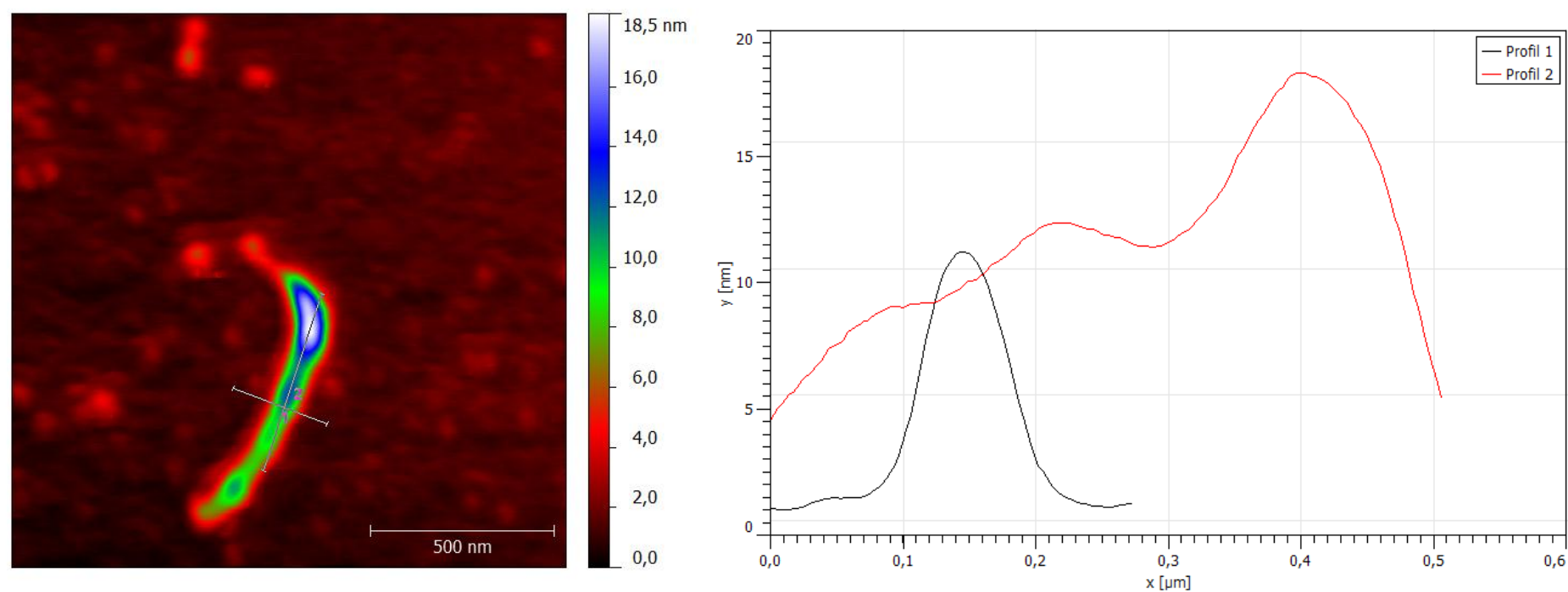


PŘÍLOHA F: GAMA SPEKTRUM AKTIVAČNÍHO DETEKTORU „JJ“

PŘÍLOHA G: SNÍMEK NEORIENTOVANÝCH CNT Z MIKROSKOPU AFM



Obr. G-1: Snímek uhlíkové nanotrubky z mikroskopu atomových sil



Obr. G-2: Výškový profil uhlíkové nanotrubky

PŘÍLOHA H: FOTODOKUMENTACE PRŮBĚHU MĚŘENÍ



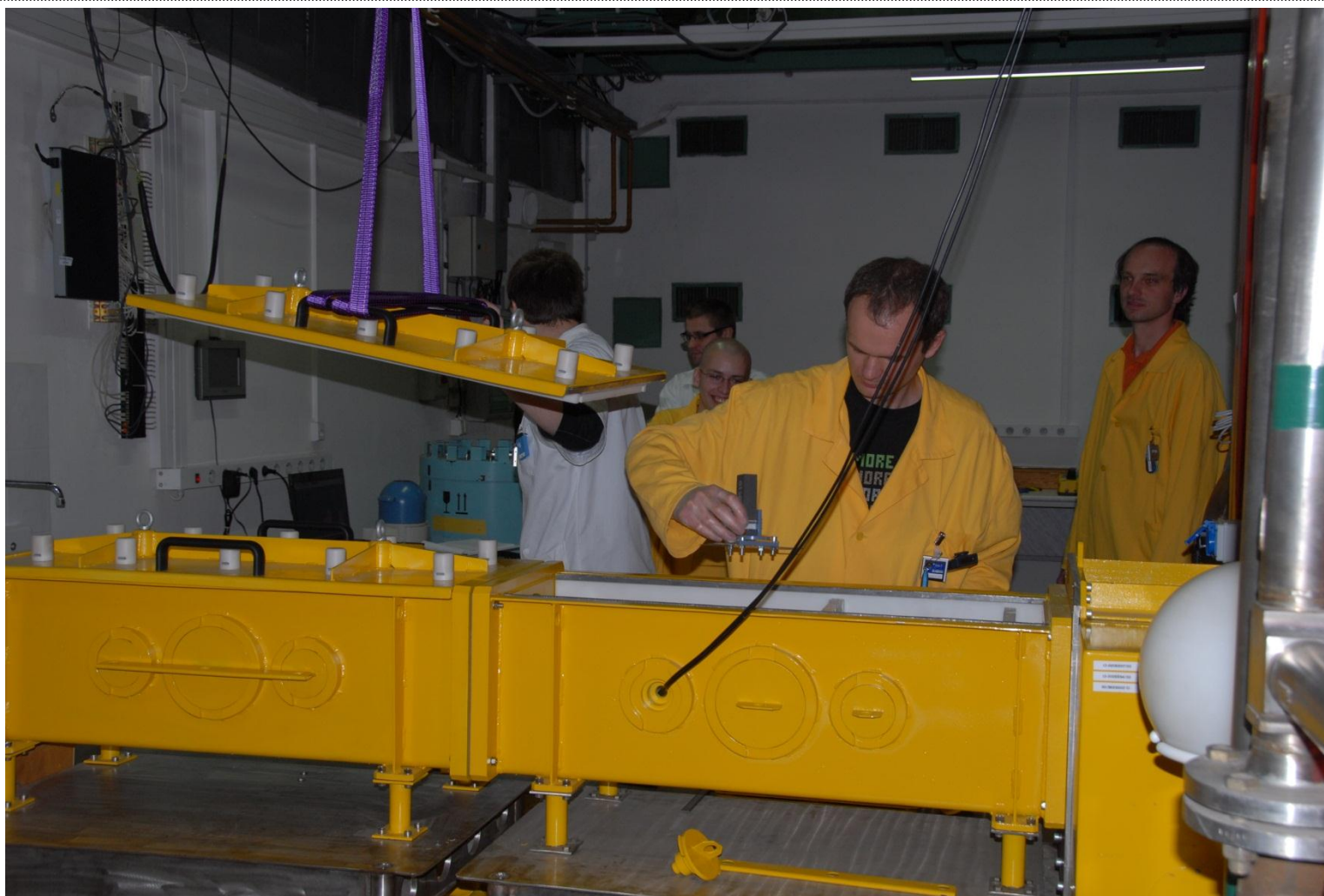
Obr. H-1: Otevírání zátky horizontálního radiálního kanálu



Obr. H-2: Umísťování a kalibrace experimentálního zařízení



Obr. H-3: Otvírání měřicího boxu



Obr. H-4: Vkládání vzorku do měřícího boxu (grafit)



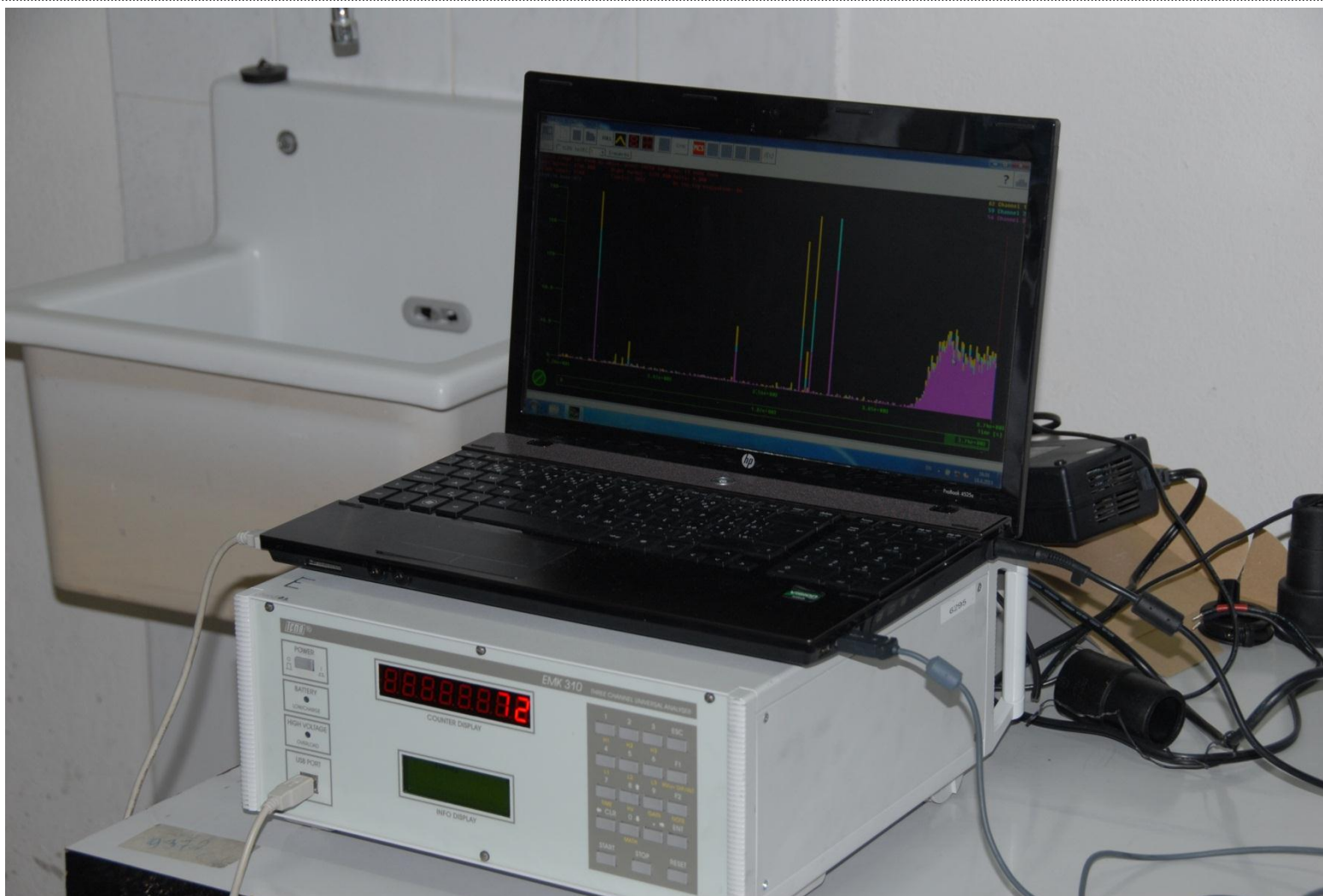
Obr. H-5: Umístění grafitu v experimentálním zařízení



Obr. H-6: Umístění neorientovaných CNT v experimentálním zařízení



Obr. H-7: Upevnění orientovaných CNT v držáku vzorků



Obr. H-8: Načítání dat z ^3He detektorů



Obr. H-9: Příprava aktivačních detektorů pro měření



Obr. H-10: Měření aktivačních detektorů na gama detektoru